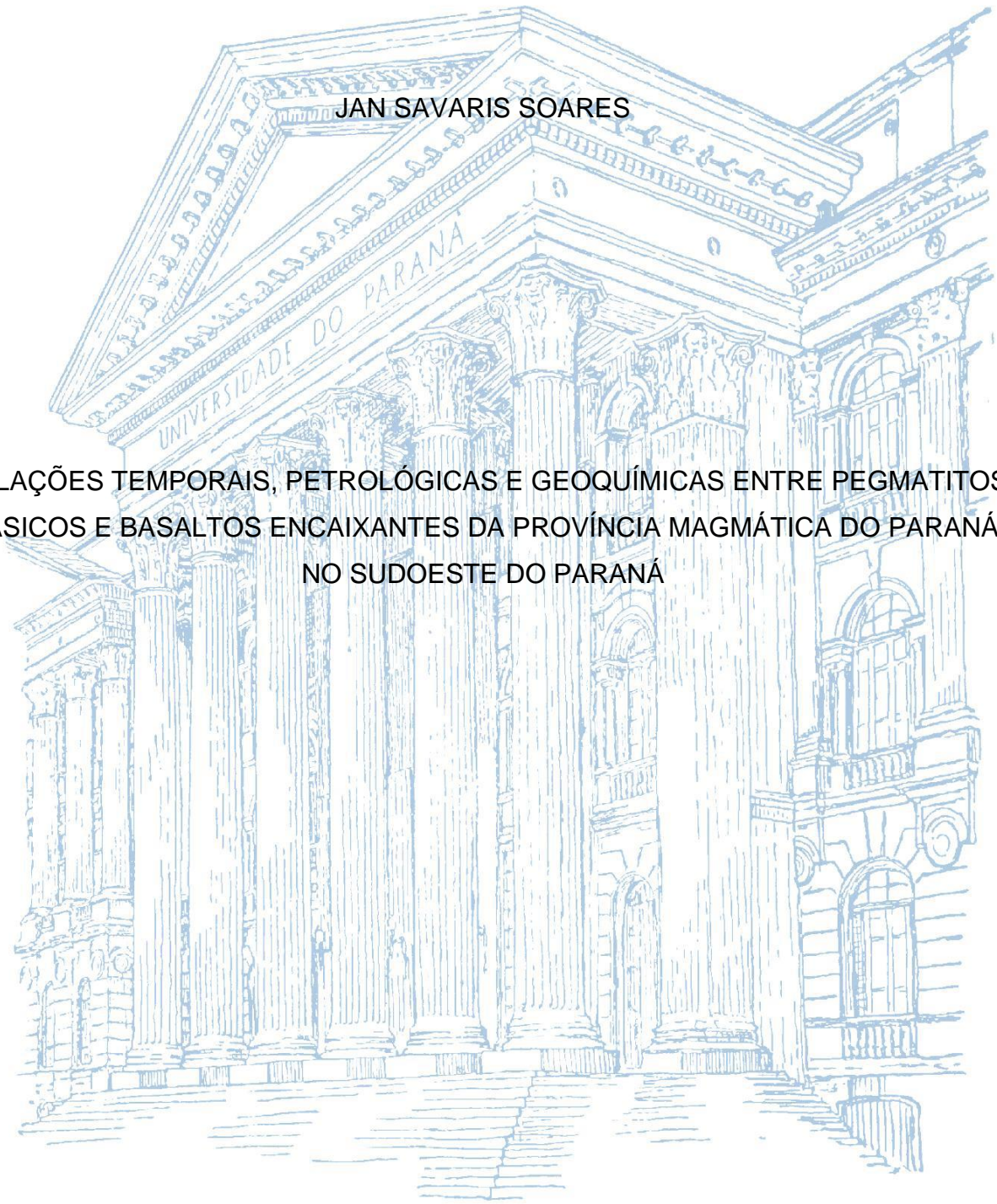


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JAN SAVARIS SOARES

RELAÇÕES TEMPORAIS, PETROLÓGICAS E GEOQUÍMICAS ENTRE PEGMATITOS  
BÁSICOS E BASALTOS ENCAIXANTES DA PROVÍNCIA MAGMÁTICA DO PARANÁ  
NO SUDOESTE DO PARANÁ



CURITIBA

2016

JAN SAVARIS SOARES

RELAÇÕES TEMPORAIS, PETROLÓGICAS E GEOQUÍMICAS ENTRE PEGMATITOS  
BÁSICOS E BASALTOS ENCAIXANTES DA PROVÍNCIA MAGMÁTICA DO PARANÁ  
NO SUDOESTE DO PARANÁ

Dissertação apresentada como requisito parcial à  
obtenção do grau de Mestre em Geologia, no  
Programa de Pós-Graduação em Geologia, Setor de  
Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Eleonora Maria Gouvêa  
Vasconcellos

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cristina Valle Pinto-Coelho

CURITIBA

2016

---

S676r

Soares, Jan Savaris

Relações temporais, petrológicas e geoquímicas entre pegmatitos básicos e basaltos encaixantes da Província Magmática do Paraná no sudoeste do Paraná / Jan Savaris Soares. – Curitiba, 2016.

120 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geologia, 2016.

Orientador: Eleonora Maria Gouvêa Vasconcellos – Co-orientador: Cristina Valle Pinto-Coelho.

Bibliografia: p. 104-109.

1. Pegmatitos - Capanema (PR). 2. Pegmatitos - Barracão (PR). 3. Rochas ígneas. I. Universidade Federal do Paraná. II. Vasconcellos, Eleonora Maria Gouvêa. III. Pinto-Coelho, Cristina Valle. IV. Título.

CDD: 552.1

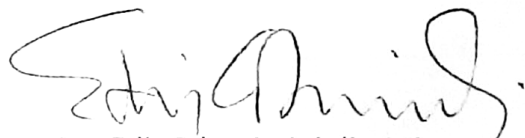
---

## TERMO DE APROVAÇÃO

**JAN SAVARIS SOARES**

*“Relações temporais, petrológicas e geoquímicas entre pegmatitos básicos e basaltos encaixantes da Província Magmática do Paraná, no Sudoeste do Paraná.”*

Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Geologia, área de concentração em Geologia Exploratória, da Universidade Federal do Paraná. Comissão formada por:



Dr. Edir Edemir Arioli - Mineropar



Prof. Dr. Valdecir de Assis Janasi - USP



Profª. Drª. Eleonora Maria Gouvêa Vasconcellos – UFPR  
Presidente

Curitiba, 12 de maio de 2016.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à todas as pessoas e instituições que se envolveram em meu trabalho para me orientar, auxiliar, apoiar e fornecer recursos por acreditar em meu potencial. Agradeço à UFPR, pela caminhada da graduação, disposição de material, infraestrutura de pesquisa e excelência de ensino e ao Programa de Pós-Graduação em Geologia pela oferta do mestrado.

À minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Eleonora Maria Gouvêa Vasconcellos, pela confiança e amizade, resiliência nas horas de adversidades, pela competência em ensinar e coordenar e pela ainda maior competência em encontrar tempo em sua agenda para me orientar.

À minha coorientadora, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cristina Valle Pinto-Coelho, por ter feito o primeiro convite para ingressar na pós-graduação, pelas inúmeras correções e pelas conversas de corredor que não constam nas referências mas guardo como lembrança e conhecimento para a vida.

Agradeço ao Prof. Dr. Otavio Augusto Boni Licht, pela motivação por meio do seu contagiante amor pela geologia, por viabilizar o campo, auxiliar em discussões e pelos ensinamentos.

Ao Prof. Dr. Excelso Ruberti pela inserção no Projeto Temático, por se encarregar em resolver contratempos com as análises químicas e pela disposição.

Ao Prof. Dr. Valdecir de Assis Janasi e ao Prof. Dr. Edir Edemir Arioli pelas excelentes sugestões e correções feitas na defesa.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo recurso cedido por meio do Projeto Temático, processo nº 12/06082-6, intitulado “A Província Magmática Paraná-Etendeka no Brasil: relações temporais e petrológicas entre o magmatismo toleítico e alcalino e suas implicações geodinâmicas”, coordenado pelo Prof. Dr. Excelso Ruberti, e ao Serviço Geológico do Paraná (MINEROPAR) pela logística e colaboração por parte de seus pesquisadores.

Ao secretário Kazutoshi Milton Matsugano por sempre auxiliar nas inúmeras questões sobre a Pós-Graduação.

Ao Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) e seus profissionais pela competência e atenção – principalmente: Rodrigo Secchi, Franciele Oliveira Czervinski,

Marcelo Adriano Corrêa Maceno e Leandro Keiji Maurer Ozahata –, ao Laboratório de Laminação (LAMIN) e ao funcionário técnico-administrativo Adilson Antônio Dalagassa pela confecção das lâminas petrográficas.

À família, pelo apoio, ajuda com custos e por me possibilitar concretizar meus sonhos. Aos meus colegas geólogos e não geólogos com os quais compartilho esses dois anos de elaboração dessa pesquisa, pelo companheirismo e atenção. Ao Allan Silva Gomes pela ajuda na interpretação dos dados e discussões, e aos amigos Leonardo Mairink Barão, Giovana Marques da Cruz, Gustavo Lopes Queiroz, Suzane Beraldin, Renato Augusto Spagnol e Fernanda Caroline Borato Xavier que estiveram ao meu lado e apoiaram com sugestões à pesquisa e/ou – não menos importante – boas conversas. Ao amigo Marcell Leonard Besser pelo incentivo e pelos conselhos antes e durante o mestrado.

Aos que dividiram seus conhecimentos decorrentes dos excelentes trabalhos realizados sobre as rochas vulcânicas da Província Magmática do Paraná e me estimularam durante o mestrado: Carlos Henrique Nalin Ferreira – que também me acompanhou em campo –, Juliana Costa e Luanna Chmyz.

## RESUMO

Dentre os processos de segregação e diferenciação magmática que ocorrem tardiamente, os pegmatitos básicos incluem-se como resultado de líquidos segregados da base para porções intermediárias de derrames espessos inflados do tipo *pahoehoe* que preenchem zonas de baixa pressão. Como resultado, têm-se corpos horizontais a sub-horizontais (lençóis) ou verticais (cilindros), que possuem diferenças petrológicas e geoquímicas quando comparados ao basalto encaixante. A caracterização desses contrastes é o objetivo principal do trabalho, bem como a comparação entre as ocorrências de pegmatitos básicos nos municípios de Barracão e Capanema no sudoeste do Paraná. Em Barracão observa-se um cilindro vertical que se propaga horizontalmente na parte superior do derrame formando lençóis pegmatíticos horizontais associados, além de corpos que se afinam como vênulas e cortam-se, formando feições semelhantes a *stockworks*. Em Capanema são observados apenas lençóis pegmatíticos. Os afloramentos estudados têm assembleias minerais semelhantes, considerando que nos pegmatitos os cristais são cerca de cinco a vinte vezes maiores que nos basaltos. Os pegmatitos e basaltos constituem-se em média por 50 a 60% labradorita; 20 a 35% augita; 5 a 10% de opacos e, subordinadamente, vidro vulcânico, clorita, hidróxidos de ferro, argilominerais e apatita. Exclusivamente em Capanema ocorre até 20% de celadonita na matriz dos pegmatitos. A textura em sua maioria é subofítica e a estrutura variolítica. Condições de rápido resfriamento, baixa nucleação e difusão facilitada pela menor viscosidade do líquido formador são relacionadas à formação dos pegmatitos e são corroboradas por feições como cristais de labradorita com terminações em cauda de andorinha, agregados de labradorita compondo a matriz da rocha e formando esferulitos, intercrescimento simplectítico entre labradorita e a augita, cristais com hábito esquelético, agregados de cristais de augita dispostos em leque e presença de vidro. Os pegmatitos de Capanema têm granulação maior, variando em média de 0,5 a 1,0 cm com relação a 0,2 a 0,5 cm em Barracão. Os basaltos de Capanema são mais finos, variando de 0,1 a 0,25 mm, e os de Barracão variam de 0,2 a 0,4 mm. As análises geoquímicas mostram que os pegmatitos básicos se diferenciam das encaixantes por serem rochas mais evoluídas, com enriquecimento em  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{total}}$ , elementos incompatíveis e ETR, empobrecimento em  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e valores de  $\text{SiO}_2$  semelhantes nos pegmatitos, com relação aos basaltos. Os teores de Sr separam as rochas das duas ocorrências e os teores de  $\text{K}_2\text{O}$  e Rb, mais altos em Capanema, e Y e ETRP, mais altos em Barracão, separam os pegmatitos. Os pegmatitos de Capanema têm menor dispersão de valores e diferenciam-se das encaixantes de maneira distinta, com o fracionamento de elementos traço com assinaturas semelhantes à rocha encaixante. Em Barracão, há uma gradação de valores entre pegmatitos e encaixantes, dos mais primitivos aos mais evoluídos. Conclui-se, portanto, que em termos petrográficos e geoquímicos, os pegmatitos de Capanema são mais diferenciados do que as encaixantes, quando comparados entre si e quando comparados com as rochas de Barracão.

Palavras-chave: Pegmatitos Básicos. Diferenciação Magmática. Província Magmática do Paraná.

## ABSTRACT

Among the processes of segregation and magmatic differentiation that occurs late in basalt flows, the basic pegmatites are included as consequence of segregated liquid from the base that migrates to intermediate portions of inflated thick *pahoehoe* lava flows and occupies low-pressure zones. After solidifying, the segregations form horizontal to sub-horizontal (sheets) or vertical (cylinders) structures with petrological and geochemical differences when compared to the host basalt. The characterization of these contrasts is the main objective this study, as well as the comparison of the occurrences of Barracão and Capanema in southwestern of Paraná. In Barracão it's observed a vertical cylinder which spreads horizontally in the upper zone of the flow and form pegmatite sheets and venules that form features similar to stockworks. In Capanema, pegmatites were observed only in the form of sheets. Both outcrops show similar mineralogy, whereas the pegmatite crystals are five to twenty times bigger than in basalts. The pegmatites and basalts are formed on average by 50-60% labradorite; 20 to 35% augite; 5-10% opaque minerals and, subordinately, volcanic glass, chlorite, iron hydroxides, clay minerals and apatite. Exclusively in Capanema occurs up to 20% of celadonite in the groundmass of pegmatites. The texture is mostly subophytic and the structure is variolitic. Rapid cooling rates, lower nucleation density and accelerated diffusion rates, facilitated by lower viscosity of the forming liquid, can be related to the formation of pegmatites and are supported by features such as swallow-tailed labradorite, labradorite aggregates composing the rock groundmass and forming spherulites, symplectitic intergrowth between labradorite and augite, skeletal crystals, fan-shaped aggregates of augite and the presence of interstitial glass. Capanema pegmatites have coarser grains, on average ranging from 0.5 to 1.0 cm and in Barracão from 0.2 to 0.5 cm. The Capanema basalts are thinner, ranging from 0.1 to 0.25 mm, and 0.2 to 0.4 mm in Barracão. The oxide analysis shows that the basic pegmatites differ from host rocks for presenting a more evolved rock trend, with enrichment in  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{total}}$ , incompatible elements and REE, depletion of  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and similar values of  $\text{SiO}_2$  in pegmatites, compared to basalts. The Sr content divide the rocks of the two occurrences while  $\text{K}_2\text{O}$  and Rb, with higher concentrations in Capanema, and Y and HREE, with higher concentrations in Barracão, separate the two pegmatites occurrences. Pegmatites from Capanema have lower dispersion of values and differentiate from the host rocks distinctively with fractionation of trace elements with similar signatures to the host rock. In Barracão, there is a gradation of values between pegmatites and host rocks, from the most primitive to the most evolved. Thus, by the petrographic and geochemical aspects, segregations of Capanema are more differentiated than their host rocks and than rocks from Barracão.

Keywords: Basic Pegmatites. Magmatic Differentiation. Paraná Magmatic Province.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Mapa do arcabouço estrutural da Bacia do Paraná, evidenciando os elementos tectônicos lineares que apresentam três direções principais: NW-SE, NE-SW e E-W. (Zalán *et al.*, 1987). ..... 19
- Figura 2 - Mapa geológico da Bacia do Paraná com as supersequências, de acordo com Milani *et al.* (2007). ..... 20
- Figura 3 - Localização da Província Magmática do Paraná, distribuição das rochas básicas, intermediárias e ácidas e padrão dos diques associados. Fonte: Licht & Lima (2014). ..... 22
- Figura 4 - Distribuição fanerozoica das LIP's, mostrando em azul as plumas transitórias e em vermelho as plumas permanentes. Fonte: Coffin *et al.* (2006). ..... 23
- Figura 5 - Mapa topográfico e batimétrico com grid quadrado de ca. 3 km, gerado por Bizzi & Vidotti (2003) a partir de dados derivados de satélite, evidenciando três ambientes tectônicos maiores (Atlântico Central, Atlântico Sul e Platô das Malvinas), duas zonas de fraturas principais (Zona de Fratura Equatorial e Zona de Fratura Agulhas-Malvinas), duas elevações batimétricas (Cadeia Walvis e Elevação Rio Grande) e duas plumas (Trindade e Tristão da Cunha). ..... 24
- Figura 6 - Associação dos *gaps* Si-Zr-Ti-P para classificar as rochas da PMP. A coluna à direita da nomenclatura dos tipos mostra a quantidade absoluta e relativa de amostras para cada tipo geoquímico. (Licht & Lima, 2014). ..... 28
- Figura 7 - Variação das tipologias geoquímicas de Licht & Lima (2014) em superfície. As linhas vermelhas representam as direções gerais das seções verticais que são apresentadas na Figura 8. Municípios: AS – Asunción; BA – Buenos Aires; BB – Brasília; BH – Belo Horizonte; CB – Cuiabá; CG – Campo Grande; CT – Curitiba; FL – Florianópolis; GO – Goiânia; MT – Montevideo; PA – Porto Alegre; RJ – Rio de Janeiro; SP – São Paulo. Legenda: Tipo 1 Centro-Norte representado por “1 (C-N)”; Tipo 1 Sul representado por “1(S)”. ..... 29
- Figura 8 - Seções verticais indicadas pelas linhas vermelhas da Figura 7 (Licht & Lima, 2014). Os códigos dos poços estão indicados no topo das seções. ..... 30
- Figura 9 - Distribuição regional das formações Covó, Candói, Barracão e Cascavel, de acordo com Arioli & Licht (2013). ..... 32
- Figura 10 - Seção geológica ilustrativa de Barracão, com base nos pontos recuperados da base de dados de Arioli & Licht (2013), demarcado o afloramento com ocorrência de pegmatitos básicos. As altitudes foram tiradas com GPS e os contatos são controlados na encosta, sendo inferidos para dentro do maciço. .... 33
- Figura 11 - Localização dos pontos de estudo em Capanema e estradas de acesso. Imagem do Google Earth obtida em 25 de abril de 2015. .... 41
- Figura 12 - Localização dos pontos de estudo em Barracão e estradas de acesso. Imagem do Google Earth obtida em 25 de abril de 2015. .... 41

- Figura 13 - Modelo de inflação. (a) Início do fluxo de lava; (b) a injeção contínua de lava gera inflação, soerguimento e quebras, além do avanço do derrame; (c) sem injeção de lava, o derrame começa a solidificar e líquidos residuais acomodam-se verticalmente (cilindros) e horizontalmente (lençóis); (d) derrame já solidificado, com padrão de fraturas irregular no topo e colunar e plana no centro. Adaptado de Self *et al.*, 1997.....48
- Figura 14 - Esquema ilustrando as fases de formação dos pegmatitos. Adaptado de Puffer & Horter (1993).....50
- Figura 15 - Esquema ilustrando o processo de migração para a formação dos pegmatitos básicos. Adaptado de Goff (1996).....52
- Figura 16 - Coluna indicando as porções e feições de um derrame, os processos envolvidos e a estimativa gráfica da quantidade de vesículas. No lado esquerdo há indicadores dos níveis do derrame e informações sobre as feições. Esquema adaptado de Hartley & Thordarson (2009). Estimativa de vesículas segundo Self *et al.* (1998). .....53
- Figura 17 - Localização dos municípios de Barracão e Capanema (PR), destacados em vermelho, e tabela com coordenadas geográficas (WGS 84) dos pontos estudados. A área demarcada com cor mais escura representa a extensão da PMP no Paraná. ....55
- Figura 18 - (A) Afloramento de basalto em Barracão, contendo pegmatitos básicos concentrados na área demarcada; (B) Formação de lobos, provavelmente relacionados ao processo de inflação, associados a quebras, indicadas pela flecha, formadas pela contração devido ao resfriamento; (C) Destaque ao Cilindro vertical (cil-1 e cil-2) e ramificações horizontais (peg-1, peg-2 e peg-3). Contatos entre o pegmatito básico e o basalto destacados em amarelo. Município de Barracão; (D) Contatos semelhantes a *stockwork* entre o pegmatito básico (área tracejada) e o basalto. Município de Barracão (E) Contatos entre o pegmatito básico (área tracejada) e o basalto de Capanema; .....57
- Figura 19 - (A) Contato de pegmatito básico e basalto em amostra de Barracão; (B) Amostra de pegmatito de Capanema, com leques de augita (Aug), prismas de labradorita (Lab), com a presença de celadonita (Cel);.....59
- Figura 20 - Fotomicrografias (A) Gerações de cristalização de labradorita (Lab) no pegmatito básico, polarizadores paralelos (P//). Geração “1” representada por fenocristais de labradorita. Geração “2” representada por cristais de labradorita da matriz. Pegmatito Capanema; (B) Cristais ripiformes de augita (Aug), com opacos esqueléticos. Nas bordas, há cristais de clorita (Chl). Labradorita com terminações em cauda de andorinha (flecha amarela). P//. Pegmatito de Capanema; (C) Intercrescimento simplectítico de augita e labradorita, polarizadores cruzados (PX). Pegmatito de Barracão; (D) Celadonita (Cel) em agregados fibrorradiados na matriz. PX. Pegmatito de Capanema. ....61
- Figura 21 – Fotomicrografias dos basaltos em P// para comparação da granulação: (A) basalto de Barracão; (B) basalto de Capanema. Aug = augita; Lab = labradorita....62



Figura 22 - Diagrama milicatônico $R_1R_2$ ( $R_1=4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)$ x $R_2=6Ca+2Mg+Al$ ) de De La Roche et al. (1980).....	66
Figura 23 - Diagramas de variação do tipo Fenner, para óxidos maiores utilizando MgO como óxido discriminante, para as rochas de Barracão e Capanema.....	67
Figura 24 - Comparação entre as encaixantes e os pegmatitos básicos de Barracão e Capanema em diagrama mutielementar para elementos traço normalizados pelo manto primordial de Wood et al. (1979). ....	68
Figura 25 - Diagrama de ETR normalizados pelo condrito de McDonough & Sun (1995) para os pegmatitos básicos e rochas encaixantes de Barracão e Capanema. ....	70
Figura 26 - (A) Amostra de níveis pegmatíticos “P” e níveis basálticos “Bas” de Barracão. Ocorre também um plano de fratura preenchido por carbonato; (B) Amostra de pegmatito de Capanema, com leques de augita (Aug), prismas de laboradorita (Lab), com a presença de celadonita (Cel). ....	79
Figura 27 - Fotomicrografia do contato entre o pegmatito básico e o basalto de Barracão: (A) em P//; (B) em PX.....	80
Figura 28 - Fotomicrografias (A) Gerações de cristalização de laboradorita (Lab) no pegmatito básico, polarizadores paralelos (P//). Geração “1” representada por fenocristais de laboradorita. Geração “2” geração matricial, representada por cristais menores de laboradorita. Pegmatito de Capanema; (B) Fenocristais de laboradorita com terminações em cauda de andorinha. Pegmatito de Barracão. P//.....	81
Figura 29 - (A) Intercrescimento simplectítico de augita e laboradorita, polarizadores cruzados (PX). Pegmatito de Barracão; (B) Cristais ripiformes de augita (Aug), com minerais opacos esqueléticos. Nas bordas, formam-se cristais de clorita (Chl).....	81
Figura 30 - Cristais de celadonita de Capanema. (A) Cristais em amígdala. P//; (B) Cristais em agregados fibrorradiados na matriz. PX. ....	82
Figura 31 - Minerais opacos: (A) com feições de espinha de peixe (flecha amarela) e em secção triangular esquelética (flecha vermelha); (B) cristais aciculares em direções distintas, concentrando-se junto aos cristais de laboradorita e augita da segunda geração. ....	82
Figura 32 - Cristais de carbonato (Cb) preenchendo cavidades e interstícios. PX. Pegmatito Capanema.....	83
Figura 33 – Fotomicrografias da granulação: (A) basalto de Barracão; (B) basalto de Capanema. P//.....	84
Figura 34 - Fotomicrografias de basaltos de Capanema: (A) Diferentes gerações de cristalização de laboradorita no basalto. Geração “1” representada pela primeira geração de laboradorita, composta por fenocristais. Geração “2” representada por cristais ripiformes menores de laboradorita, compondo a matriz. PX; (B) duas gerações de cristalização de minerais opacos. A primeira geração representada por flechas e a segunda geração representada por círculos. P//. ....	85

Figura 35 - Diagrama milicatônico $R_1R_2$ ( $R_1=4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)$ x $R_2=6Ca+2Mg+Al$ ) de De La Roche et al. (1980).....	86
Figura 36 - Diagrama TAS (total álcalis-sílica - $[Na_2O+K_2O]$ x $SiO_2$ ) de Le Maitre <i>et al.</i> (1989) .....	87
Figura 37- Diagrama AFM $[A=(Na_2O + K_2O) - F= (Fe_2O_3) - M= (MgO)]$ com a divisão de Irvine & Baragar (1971). .....	88
Figura 38 - Diagrama $Al$ x $(Fe_{total} + Ti)$ x $Mg$ de Jensen (1976). .....	88
Figura 39 - Diagramas de variação do tipo Fenner, para óxidos maiores utilizando $MgO$ como óxido fracionante, para as rochas basálticas encaixantes e os pegmatitos básicos de Barracão e Capanema. ....	89
Figura 40 - Diagrama multielementares para elementos traço normalizados para o manto primordial de Wood <i>et al.</i> (1979) para as rochas encaixantes e os pegmatitos básicos de Barracão e Capanema. ....	91
Figura 41 - Comparação entre as rochas encaixantes e os pegmatitos básicos de Barracão e Capanema nos diagramas multielementares para elementos traço normalizados pelo manto primordial de Wood <i>et al.</i> (1979).....	91
Figura 42 - Diagrama multielementares para elementos traço a partir da normalização dos pegmatitos pela amostra de rocha encaixante mais primitiva de cada uma das ocorrências. ....	92
Figura 43 - Comparação entre as rochas encaixantes e os pegmatitos básicos de Barracão e Capanema nos diagramas multielementar para elementos traço normalizados para o manto primordial de Wood <i>et al.</i> (1979). ....	92
Figura 44 - Diagramas de variação do tipo Fenner para os elementos traço $Sr$ , $Rb$ , $Y$ e $Ni$ em $\mu g/g$ , utilizando $MgO$ (% peso) como óxido fracionante, para as rochas de Barracão e Capanema. ....	93
Figura 45 - Diagrama multielementar para ETR normalizadas pelo condrito de McDonough & Sun (1995) para os pegmatitos básicos e rochas encaixantes de Barracão e Capanema. ....	94
Figura 46 - Diagrama $Fe_2O_3$ x $TiO_2$ (Peate <i>et al.</i> 1992) para magmas de alto $TiO_2$ e correlação com as rochas estudadas. ....	95
Figura 47 - Diagrama $Zr/Y$ x $Sr$ (Peate <i>et al.</i> 1992) para magmas de alto $TiO_2$ e correlação com as rochas estudadas. ....	96
Figura 48 - Intercrescimento entre Magnetita (Mag) e Ilmenita (Ilm) em pegmatito de Capanema. A – Demarcação do mineral analisado; B – Detalhe com as feições de intercrescimento e pontos de obtenção dos dados por EDS. A Tabela indica a porcentagem composicional dos óxidos nos pontos analisados. Imagens em MEV - ERE. ....	98
Figura 49 - Hábito dos minerais opacos (Mag/Ilm) em um cristal de augita em pegmatito de Capanema. A - Demarcação do mineral analisado; B - Detalhe com tonalidades	

cinzas mais claras e mais escuras evidenciando o intercrescimento entre magnetita e ilmenita e pontos de obtenção dos dados geoquímicos. A Tabela indica a porcentagem composicional dos óxidos nos pontos analisados. Imagens em MEV - ERE. ....99

Figura 50 – Cristais de labradorita. A – Localização dos pontos analisados da Tabela A; B – Localização dos pontos de amostragem da Tabela B. As Tabelas indicam a porcentagem composicional dos óxidos nos pontos analisados. Imagens em MEV - ERE. ....99

Figura 51 – Demarcação e retirada de porções das amostras para garantir resultados confiáveis. a) Capa de alteração; b) Preenchimentos de cavidades. .... 110

Figura 52 - Ferramentas e equipamentos utilizados para britar as amostras: a) Panela de carbeto de tungstênio contendo a amostra a ser quebrada com o martelo. b) Britador de mandíbula..... 111

Figura 53 - Pulverização das amostras: a) Panela de carbeto de tungstênio com rebolos e b) Moinho de discos. .... 111

Figura 54 - Amostras pulverizadas e colocadas em béqueres. .... 112

Figura 55 – Preparação das amostras para o cálculo da perda ao fogo e confecção da pérola fundida: a) Estufa para secagem das amostras e b) Fusora. .... 113

Figura 56 - Equipamento de fluorescência de raios X. .... 113

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição utilizada para definição de magmas-tipo para as rochas basálticas da PMP. Dados resultantes de análise por fluorescência de raios X. Fonte: Peate (1989). .....	27
Tabela 2 - Composição utilizada para definição de magmas-tipo para as rochas riolíticas da PMP. Dados resultantes de análise por fluorescência de raios X. Fonte: Piccirillo <i>et al.</i> (1988). .....	27
Tabela 3 - Coluna estratigráfica do sudoeste da PMP, denominado Grupo Serra Geral por Arioli & Licht (2013), com unidades litostratigráficas e as respectivas associações faciológicas.....	31
Tabela 4 - Processos e seus resultados observados na PMP. Fonte: Arioli & Licht (2013). .....	35
Tabela 5 - Coordenadas dos afloramentos estudados. ....	40
Tabela 6 - Resultado das análises dos óxidos, elementos traço, ETR e cálculo dos minerais normativos para os pegmatitos (Peg) e basaltos (Bas) de Barracão (BA, BB e PR) e Capanema (CA). ....	64
Tabela 7 - Classificação dos pegmatitos básicos e encaixantes segundo os tipos de Licht & Lima (2014). Os valores usados como limites são: 62,02% SiO <sub>2</sub> ; 522,15 µg/g Zr; 2,85 % TiO <sub>2</sub> ; 0,413% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> . A divisão da Província Sul e Centro-Norte do Tipo 1 foi feita pela localização geográfica.....	97
Tabela 8 - Comparação entre os basaltos e pegmatitos de Capanema e Barracão. ....	101

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	15
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivo Geral	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
<b>2</b>	<b>GEOLOGIA REGIONAL</b>	18
2.1	A BACIA DO PARANÁ	18
2.2	A PROVÍNCIA MAGMÁTICA DO PARANÁ	21
2.2.1	Origem do Magmatismo	24
2.2.2	Geoquímica	26
2.2.3	Litoestratigrafia da PMP no SW do Paraná	30
2.2.4	Arquitetura de derrames	34
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	36
3.1	LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	36
3.2	AQUISIÇÃO DOS DADOS	36
3.2.1	Seleção dos Afloramentos	36
3.2.2	Trabalhos de Campo e Amostragem	36
3.2.3	Análise Petrográfica	37
3.2.4	Análises por Fluorescência de raios X (FRX)	37
3.2.5	Análises por Espectrometria de Massa por Plasma com Indução Acoplada (ICP – MS)	38
3.2.6	Análises por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	38
3.3	TRATAMENTO DOS DADOS	39
3.3.1	Interpretação dos dados geoquímicos	39
<b>4</b>	<b>LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO</b>	40
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	42
5.1	APRESENTAÇÃO DO ARTIGO	42
5.2	PETROGRAFIA	79
5.2.1	Pegmatitos	79
5.2.2	Basaltos	83
5.3	INTERPRETAÇÃO GEOQUÍMICA	85
5.3.1	Óxidos	85
5.3.2	Elementos traço e terras raras (ETR)	90
5.4	CLASSIFICAÇÃO DOS PEGMATITOS BÁSICOS E ENCAIXANTES SEGUNDO DIVISÕES DE PEATE (1989) E LICHT & LIMA (2014)	95
5.5	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) ASSOCIADA À ESPECTROSCOPIA POR DISPERSÃO DE ENERGIA (EDS)	98

<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....</b>	<b>100</b>
6.1	PETROLÓGICAS .....	100
6.2	GEOQUÍMICAS.....	101
6.3	INTEGRAÇÃO E PROPOSTAS DE MODELOS DE FORMAÇÃO.....	102
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>104</b>
<b>8</b>	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>110</b>
8.1	APÊNDICE 1 .....	110
8.2	APÊNDICE 2 .....	114
8.3	APÊNDICE 3 .....	115
8.4	APÊNDICE 4 .....	120



## 1 INTRODUÇÃO

A Província Magmática do Paraná (PMP) é umas das maiores manifestações vulcânicas de caráter básico em área continental e se desenvolveu devido aos processos distensivos da litosfera. Sua origem está relacionada à separação entre os continentes sul-americano e africano, vinculados à fragmentação do megacontinente Gondwana no Eocretáceo. É considerada uma LIP (*Large Igneous Province*), de acordo com a definição de Coffin & Eldholm (1994; 2005), e seu registro encontra-se principalmente preservado ao longo da sucessão estratigráfica da Bacia do Paraná na forma de diques, soleiras e derrames.

Atualmente se reconhecem inúmeras feições dentro dos extensos derrames da PMP, como aquelas definidas por Arioli & Licht (2013). Os autores descrevem estruturas internas geradas por processos como resfriamento, fluxo, inflação, cristalização e segregação e diferenciação magmática. Dentre os processos de segregação e diferenciação magmática, incluem-se os pegmatitos básicos como produtos, que são formados a partir de líquidos em ascensão formados nas porções basais dos derrames e que preenchem zonas de baixa pressão e ocorrem normalmente em derrames espessos inflados. São processos que ocorrem tardiamente, com parte do derrame já cristalizado, e permitem a geração de diferenças petrológicas e geoquímicas quando comparados ao basalto hospedeiro.

Os pegmatitos básicos descritos no sudoeste do Paraná foram estudados primeiramente por Vasconcellos *et al.* (2001) e posteriormente detalhados por Arioli (2008), Ferreira (2011) e Silva (2011). Pegmatitos básicos são objeto de estudo também em outras províncias magmáticas, como na Província Columbia River Basalt Group (EUA) (Puffer & Horter, 1993 e Hartley & Thordarson, 2009).

Os esforços nessa pesquisa se concentram em derrames observados nos municípios de Barracão e Capanema, no sudoeste do Paraná. Pretende-se expandir a caracterização geoquímica, petrológica e evolutiva dessas feições pegmatíticas, bem como dos basaltos associados, e acrescentar subsídios para aprimorar o conhecimento acerca da PMP.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A literatura compreende uma volumosa quantidade de estudos sobre os derrames da Província Magmática do Paraná, com distintas abordagens, como a geologia, a geoquímica e a geocronologia. Visando um detalhamento, faz-se importante investigar diferenciações que venham a contribuir com o refinamento composicional da Província, reconhecendo condicionantes do arcabouço geológico passíveis de associação com a estratigrafia geoquímica. Com esta abordagem, em campanhas de mapeamento realizadas pela MINEROPAR (Serviço Geológico do Paraná), desde 2001, no Sudoeste do Paraná, foram encontrados e descritos corpos com texturas diferentes e granulação mais grossa que aquelas encontradas nos basaltos, posteriormente definidos como pegmatitos básicos.

Utilizando métodos petrológicos e geoquímicos, adquirem-se dados que permitem descrever as relações entre os pegmatitos e os basaltos encaixantes de duas ocorrências no sudoeste do Paraná. Com isso, o trabalho busca sugerir os mecanismos responsáveis pela formação desses corpos, indicando as condições de solidificação dos diferenciados pegmatíticos, constituindo importante adição ao conhecimento acerca dos episódios tardios dos derrames.

De acordo com Arioli (2008), os pegmatitos básicos desempenham um papel importante na distribuição de anomalias geoquímicas de metais e no controle litológico de mineralizações, constituindo fases importantes nos depósitos de Ni-Cu-EGP (Elementos do Grupo da Platina) associados aos óxidos cromita, ilmenita, titano-magnetita e magnetita, evidenciando a necessidade de mapear essas estruturas.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Caracterizar os pegmatitos básicos e os basaltos encaixantes da Província Magmática do Paraná nos municípios de Barracão e Capanema (sudoeste do Paraná).

### 1.2.2 Objetivos Específicos

**(I)** Descrever a área de ocorrência dos pegmatitos, visando dimensionar os corpos;

**(II)** Delimitar o posicionamento estratigráfico dos corpos pegmatíticos nas seções trabalhadas;

**(III)** Caracterizar os pegmatitos básicos e basaltos encaixantes em campo e do ponto de vista petrográfico e geoquímico;

**(IV)** Avaliar o processo de formação dos pegmatitos e em que momento, durante a solidificação dos basaltos encaixantes, ocorreu o *emplacement* destes corpos.

## 2 GEOLOGIA REGIONAL

### 2.1 A BACIA DO PARANÁ

A Bacia do Paraná é uma bacia do tipo intracratônica, com uma extensão de 1.700.000 km<sup>2</sup>. Distribui-se entre o Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai. Dividida pelos arcos de Assunção e do Rio Grande, é chamada de Bacia do Chaco-Paraná na Argentina e no Uruguai. Os limites atuais da bacia podem ser de natureza erosional ou tectônica. No primeiro caso, ocorre um afinamento da espessura dos sedimentos, sem interferências de atividades tectônicas maiores. No segundo caso, é representada por arcos e soerguimentos (Zalán *et al.*, 1987).

De acordo com Zalán *et al.* (1987), ocorrem três direções estruturais preferenciais no arcabouço estrutural da bacia, atualmente representado por estruturas NW-SE, NE-SW e E-W (Figura 1). As orientações NW-SE e NE-SW são consideradas falhas simples ou extensas zonas de falhas mais antigas e que foram ativas durante a evolução da Bacia. Os lineamentos E-W desenvolveram-se durante a fragmentação e separação do Gondwana, ativos a partir do Triássico.

A Bacia do Paraná é estudada desde as pesquisas da Comissão Geológica do Império do Brasil (1875-1877) e desde então os esforços foram continuados para melhor conhecê-la. Destacam-se os trabalhos pioneiros de White (1908) que, a partir das observações realizadas ao longo da Serra do Rio do Rastro, definiu as unidades estratigráficas que constituem as “séries” (Tubarão, Passa Dois e São Bento) e estabeleceu a Coluna White (Bosseti *et al.*, 2007 e Orlandini Filho, 2002). A partir disso, a Bacia conta com inúmeros estudos dedicados à formalização de unidades geológicas e ao estabelecimento da sua coluna estratigráfica.

Nos anos seguintes, a estratigrafia da Bacia do Paraná passou a ser um assunto amplamente estudado, destacando-se trabalhos de Sanford & Lange, 1960; Northfleet *et al.*, 1969; Schneider *et al.*, 1974; Soares *et al.*, 1978; Almeida, 1980; Fúlfaro *et al.*, 1980 e Zalán *et al.*, 1990 (citados por Milani, 1994 *et al.*). Dentre os vários esforços dedicados à formalização de unidades geológicas e ao estabelecimento da coluna estratigráfica da bacia, destaca-se a contribuição de Milani (1997), que se embasou nesses trabalhos para propor a carta estratigráfica, e Milani *et al.* (2007), que aperfeiçoaram a proposta que resultou na atual Carta Estratigráfica da Bacia do Paraná.

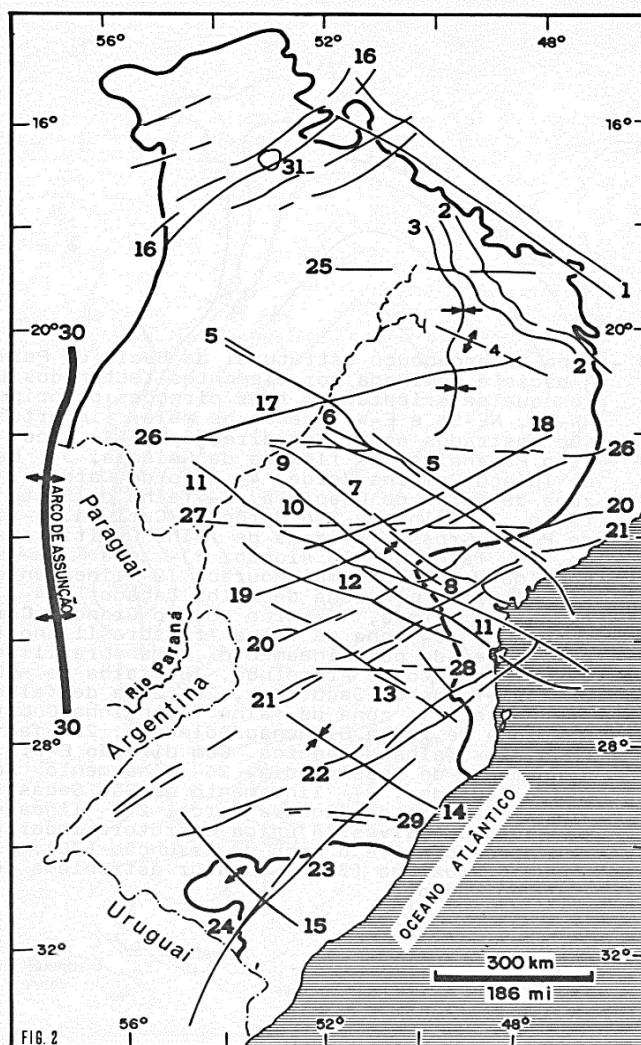


Figura 1 - Mapa do arcabouço estrutural da Bacia do Paraná, evidenciando os elementos tectônicos lineares que apresentam três direções principais: NW-SE, NE-SW e E-W. Com direção NW-SE: 1 – arco do Alto Paranaíba; 2 – flexura de Goiânia; 3 – baixo de Ipiacú/Campina Verde; 4 – alto de Cardoso; 5 – zona de falha de Guapiara; 6 – falha de Santo Anastácio; 7 – falha de São Jerônimo/Curiúva; 8 – arco de Ponta Grossa; 9 – zona de falha de Curitiba/Maringá; 10 – falha do Rio Alonzo; 11 – zona de falha Cândido de Abreu/Campo Mourão; 12 – lineamento do Rio Piquiri; 13 – zona de falha Caçador; 14 – sinclinal de Torres; 15 – arco do Rio Grande. Com direção NE-SW: 16 – zona de falha/lineamento Transbrasiliiano; 17 – lineamento de Araçatuba; 18 – falha de Guaxupé; 19 – falha de Jacutinga; 20 – zona de falha de Taxaquara; 21 – zona de falha Lancinha/Cubatão; 22 – zona de falha Blumenau/Soledade; 23 – falha do Leão; 24 – falha de Açotea. Com direção E-W: 25 – lineamento de Cassilândia; 26 – lineamento Moji-Guaçu/Dourados; 27 – lineamento de São Sebastião; 28 – lineamento de Taquara Verde; 29 – lineamento de Bento Gonçalves. (Zalán *et al.*, 1987).

A respeito da evolução tectônica da Bacia do Paraná, Zalán *et al.* (1987) e Zalán (1989) sugerem que a bacia é o resultado da superposição de três bacias, resultantes de distintas fases de subsidência. A primeira, siluriana a devoniana, formada pela associação do peso dos sedimentos depositados nas fases iniciais da bacia e do contínuo resfriamento litosférico decorrente do término da Orogênese Brasileira, encerrando-se com a Orogenia Eoherciniana; a segunda, permocarbonífera, teria se desenvolvido pelo peso dos sedimentos glaciais e esforços distensionais e foi encerrada por um

soerguimento intraplaca, que interrompeu a sedimentação no Eotriássico; a terceira, neojurássica à eocretácea, relacionada ao sobrepeso das rochas vulcânicas da Província Magmática do Paraná (PMP).

O registro estratigráfico da Bacia do Paraná compreende uma sequência sedimentar-magmática com uma espessura total máxima em torno de sete mil metros e apresenta, segundo a Carta Estratigráfica da Bacia do Paraná, uma história geológica que se estende do Neo-Ordoviciano ao Neocretáceo e divide-se, segundo as propostas de Milani *et al.* (1994; 2007) e Milani (1997), em seis supersequências. Estas são reconhecidas no registro estratigráfico da Bacia do Paraná, sendo que cada estrato corresponde a intervalos temporais com algumas dezenas de milhões de anos de duração, limitados por superfícies de discordância causadas por eventos erosivos com ampla extensão regional, as quais foram originadas por eventos tectônicos (internos e externos à bacia) e também por variações locais e globais no nível do mar. As supersequências são: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo) (Figura 2).

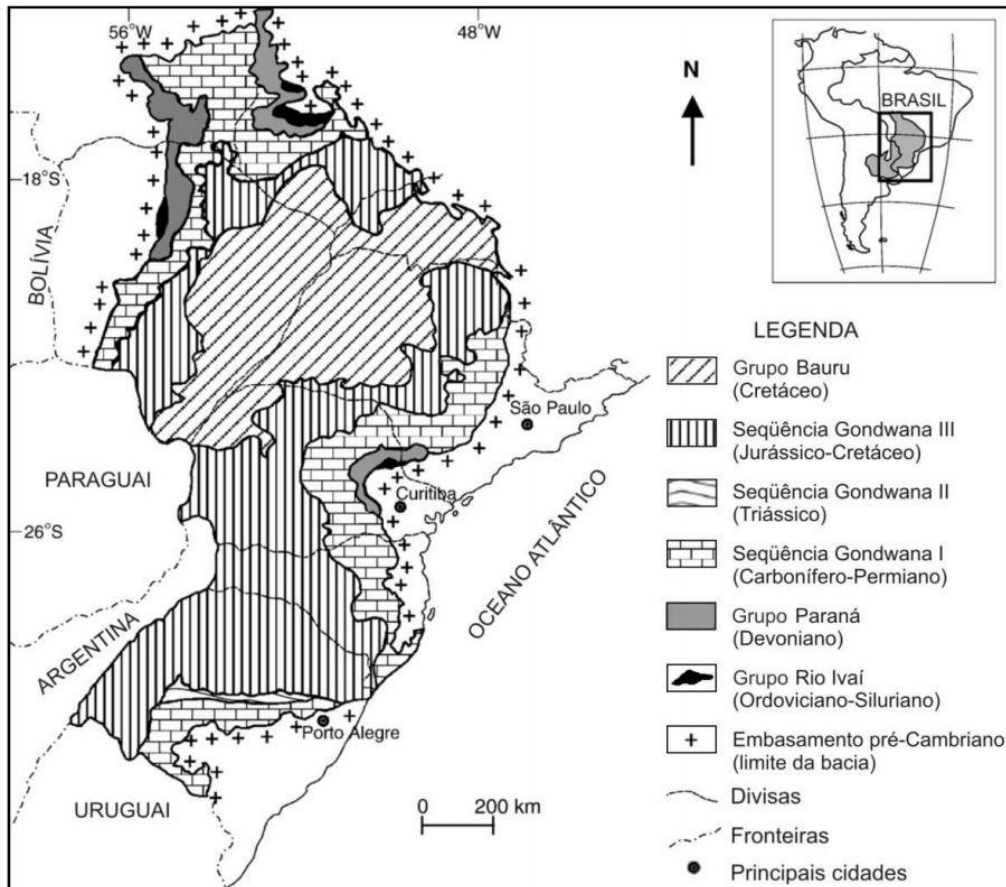


Figura 2 - Mapa geológico da Bacia do Paraná com as supersequências, de acordo com Milani *et al.* (2007).



Pertencente à proposta da Carta Estratigráfica de Milani (1997), a Supersequência Gondwana III, que engloba a formação Botucatu e a PMP, representa o primeiro episódio de sedimentação exclusivamente continental dentro da Bacia do Paraná. As rochas dessa Supersequência constituem-se predominantemente por fácies sedimentares eólicas, livres da influência do mar durante sua deposição, incluindo a Formação Botucatu que se constitui quase totalmente por arenitos médios a finos, representando o deserto Botucatu. A PMP é o resultado de uma série de episódios magmáticos no continente sul-americano que cobre parte da bacia na forma de derrames de lavas e formando diques e soleiras em meio à seção sedimentar. Caracteriza-se por uma manifestação ígnea não-oceânica, em ambiente subaéreo, intracontinental e de importante contribuição à geração da crosta continental do Planeta.

## 2.2 A PROVÍNCIA MAGMÁTICA DO PARANÁ

A terminologia empregada para designar os produtos eruptivos que cobriram a Bacia do Paraná e foram formados no Eocretáceo evoluiu com o tempo. Nos trabalhos pioneiros de White (1908) foram chamados de Formação Serra Geral, pertencente ao Grupo São Bento. Porém, foi realizada uma revisão do termo Formação Serra Geral por Arioli & Licht (2013) ao investigarem os derrames do sudoeste paranaense. Preocupando-se em escolher a categoria de unidade estratigráfica mais adequada à classificação dos diferentes conjuntos de rochas vulcânicas, vulcanoclásticas e sedimentares, os autores formalizaram a antiga Formação como Grupo Serra Geral.

A denominação de Província Magmática do Paraná (PMP) é empregada incluindo-se os derrames e as porções intrusivas preservadas na forma de diques e soleiras, e será adotada neste trabalho. Apesar dos derrames associados à PMP desenvolveram-se principalmente sobre a Bacia do Paraná, desenvolveram-se também nas áreas adjacentes à bacia, envolvendo o embasamento cristalino e as bacias marginais no Oceano Atlântico (Machado *et al.*, 2007)

Os extravasamentos da Província Magmática Paraná-Etendeka, assim denominada quando se inclui o correspondente africano, são considerados um dos maiores eventos magmáticos continentais, cobrindo cerca de  $1,2 \times 10^6 \text{ Km}^2$  no sudeste do Brasil, leste do Paraguai, norte da Argentina e Uruguai e  $8 \times 10^4 \text{ Km}^2$  na porção africana. Na Bacia do Paraná (Figura 3), a superfície coberta pelos derrames compõe até 70% das rochas da Bacia (Melfi *et al.*, 1988 e Peate *et al.*, 1992).

A atividade intrusiva da PMP é representada por soleiras e diques que acompanham, grosseiramente, as principais descontinuidades estruturais da bacia. O sistema dominante tem direção NW, transversal ao eixo maior da bacia, e é representado por arcos (como os arcos de Ponta Grossa, Campo Grande e São Gabriel) e por lineamentos tectônicos e/ou magmáticos (como os de Guapiara, São Jerônimo-Curiúva, e rios Uruguai, Camaquã e Piquiri) (Ferreira, 1982).

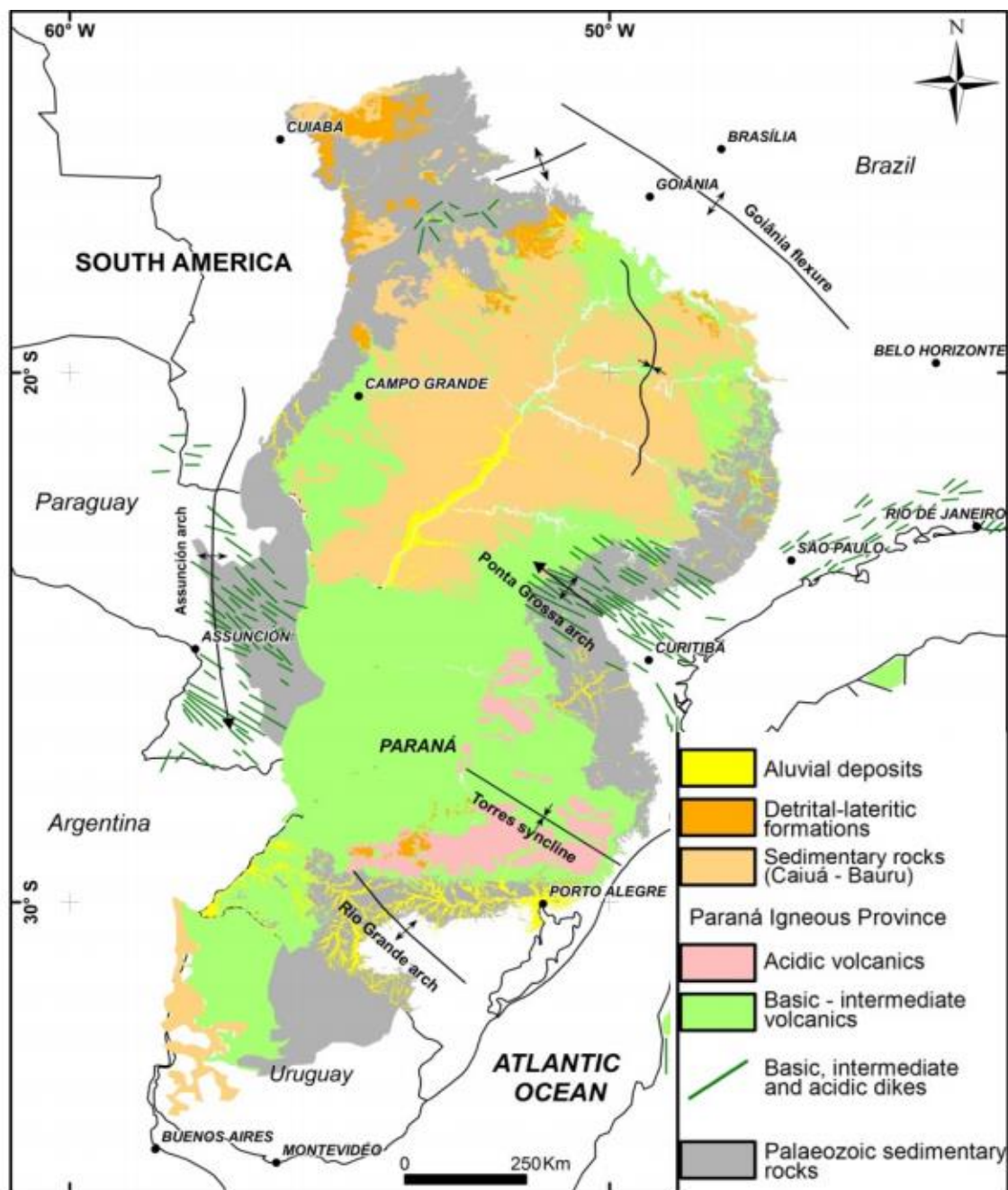


Figura 3 - Localização da Província Magmática do Paraná, distribuição das rochas básicas, intermediárias e ácidas e padrão dos diques associados. Fonte: Licht & Lima (2014).

Bryan & Ernst (2008), ao revisar a proposta de Coffin & Eldholm (1994; 2005), definem LIP's (*Large Igneous Provinces*), levando em conta as seguintes características-chave: o volume e área, a duração e definição dos pulsos, a tectônica e a composição. De acordo com estes autores, tais províncias devem cobrir uma área maior que  $0,1 \text{ Mkm}^2$  e volume maior que  $0,1 \text{ Mkm}^3$ , com tempo de vida de  $\sim 50 \text{ Ma}$ , compostas por pulsos ígneos de pequena duração ( $\sim 1\text{-}5 \text{ Ma}$ ) durante os quais mais de 75% do volume total ígneo seja extravasado. Deverá ter predominância de rochas extrusivas e intrusivas máficas (ou silicáticas em alguns casos) em ambientes não compressoriais, onde se excluem aquelas formadas por abertura oceânica. De acordo com esses critérios, a PMP pode ser definida como uma LIP (Figura 4).

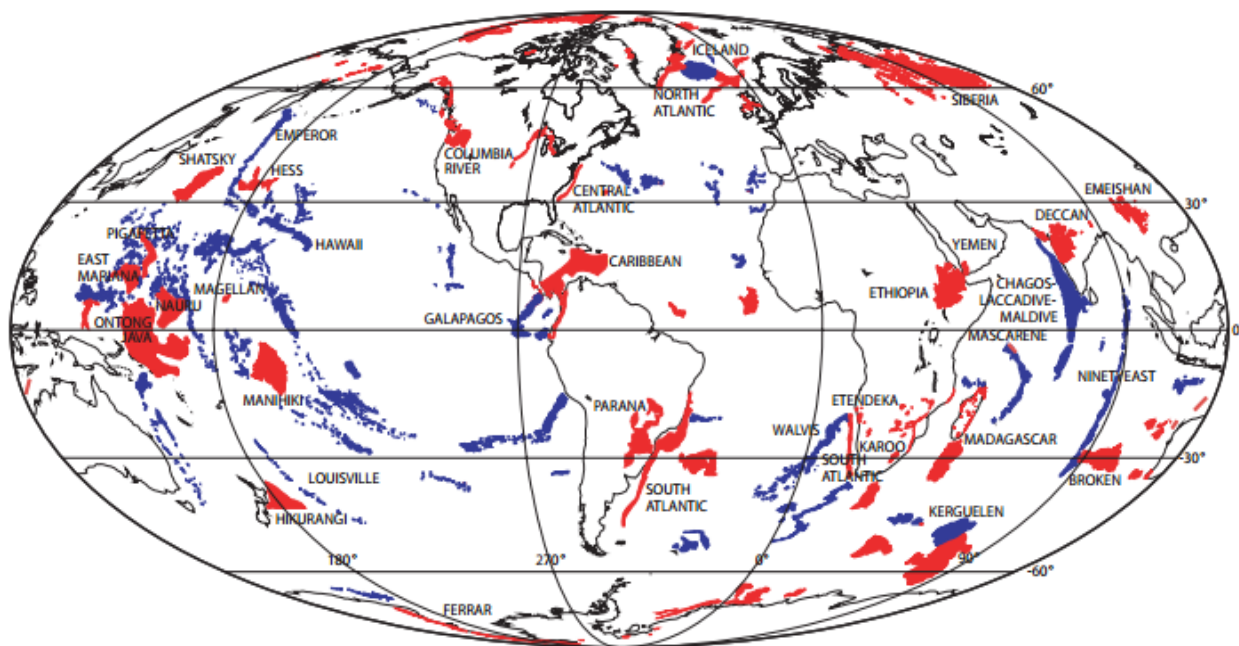


Figura 4 - Distribuição fanerozoica das LIP's, mostrando em azul as plumas transitórias e em vermelho as plumas permanentes. Fonte: Coffin *et al.* (2006).

Estudos de geocronologia foram desenvolvidos por vários autores, fornecendo diferentes contribuições acerca de idade e evolução da PMP. Mincato (2000) confirmou que o vulcanismo é mais jovem na porção norte da Província, já percebido por Peate (1989) ao analisar que havia uma migração das unidades geoquímicas para norte, dada a evolução do rifteamento. Thiede & Vasconcelos (2010) determinaram o paroxismo do vulcanismo em  $134,7 \pm 1 \text{ Ma}$  a partir de datações  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  em plagioclásios.



### 2.2.1 Origem do Magmatismo

Na margem Atlântica do território brasileiro são reconhecidos três ambientes tectônicos maiores separados por duas zonas de fratura oceânica, além de duas plumas mantélicas, conforme representado na Figura 5. A zona de fratura Equatorial e a zona de fratura Agulhas-Malvinas atuaram como os principais centros de dissipação de estresse pela deriva diferencial entre os continentes Sul-americano e Africano (Uchupi, 1989; Fouché, 1992 *in* Bizzi & Vidotti, 2003). Reconhecem-se também duas pontes de conexão com os continentes: a Cadeia Walvis, no sudoeste da Namíbia, e a Elevação Rio Grande, no sudeste do Brasil, que são as estruturas batimétricas mais proeminentes na Bacia do Atlântico Sul e constituem um par de lineamentos cujo eixo de simetria é o centro de extravasamento do Atlântico Sul, segundo O'Connor & Duncan (1990).

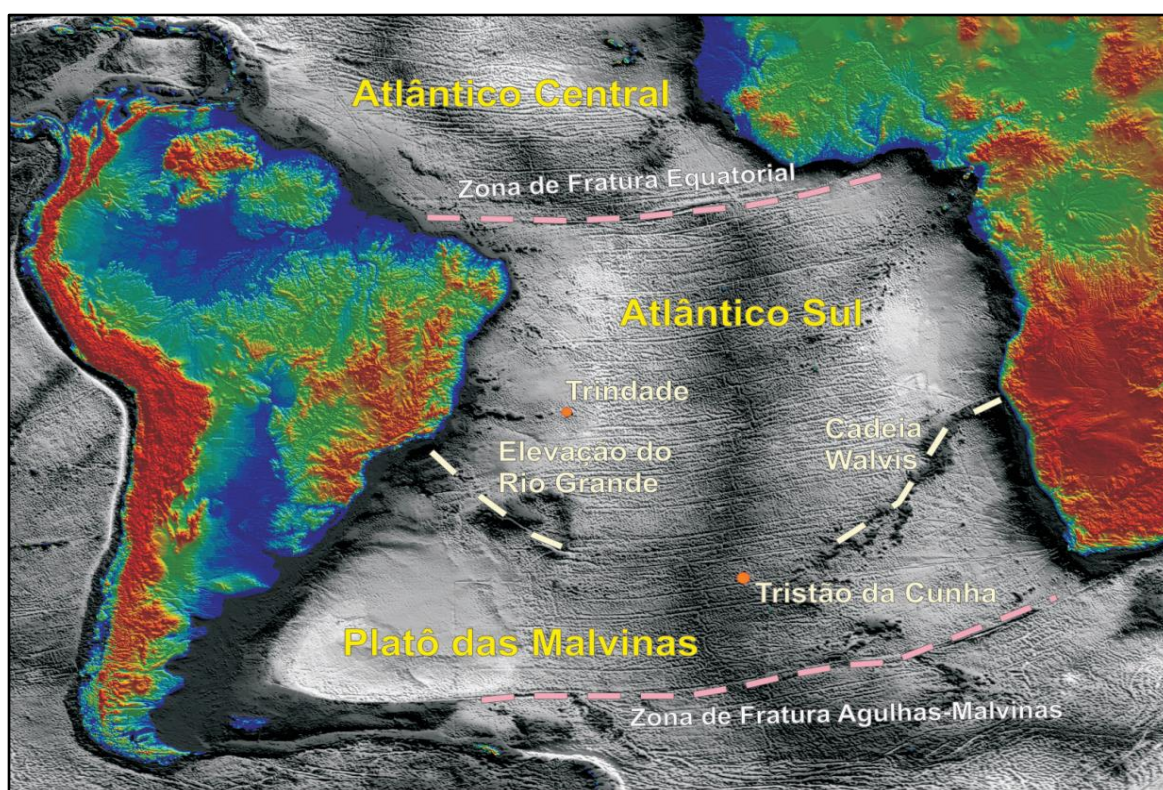


Figura 5 - Mapa topográfico e batimétrico com grid quadrado de ca. 3 km, gerado por Bizzi & Vidotti (2003) a partir de dados derivados de satélite, evidenciando três ambientes tectônicos maiores (Atlântico Central, Atlântico Sul e Platô das Malvinas), duas zonas de fraturas principais (Zona de Fratura Equatorial e Zona de Fratura Agulhas-Malvinas), duas elevações batimétricas (Cadeia Walvis e Elevação Rio Grande) e duas plumas (Trindade e Tristão da Cunha).

Essas estruturas estão relacionadas com a separação continental sul-americana e africana, porém alguns fatos ainda estão em constante debate no que diz respeito à formação da PMP. De acordo com O'Connor & Duncan (1990), a Província do Paraná -

Etendeka possui uma ligação comum à pluma mantélica Tristão da Cunha (TC) e à abertura do Oceano Atlântico Sul no Eocretáceo. Os autores acreditam que o magmatismo teria sua origem em um evento térmico, gerado por uma pluma mantélica TC, que atingiu a litosfera subcontinental sul-americana e levou à abertura do Oceano Atlântico Sul. Este magmatismo teria avançado para lados opostos, espelhando-se e produzindo a Elevação do Rio Grande e a Cadeia Walvis, respectivamente, em direção aos continentes americano e africano.

De acordo com Turner *et al.* (1996), o papel da pluma de TC teria sido passivo, contribuindo com a condução de calor que facilitaria a remobilização litosférica de um material antigo. Segundo Ernesto *et al.* (2002), há inconsistências no modelo de plumas mantélicas quando aplicadas à PMP relacionada à pluma de Tristão de Cunha. Segundo os autores, essa hipótese só pode ser admitida caso proposições a respeito de plumas mantélicas sejam aceitas, entre elas: considerar a contribuição da pluma restritamente com calor, desconsiderando o material; a pluma não estaria unida ao manto e se moveria a taxas maiores do que as anteriormente consideradas ou a pluma estaria geograficamente a 800 km ao sul; revisar as condições geoquímicas e isotópicas entre a formação da PMP e a interação entre TC e os elementos do MORB, pois da maneira proposta se tornam incongruentes.

Usando dados de elementos-traço e isótopos de Sr, Nd, Os e Pb da PMP para comparar com aqueles encontrados nas rochas da ilha oceânica de TC, Rocha-Júnior *et al.* (2013) concluíram que não há evidências da participação da pluma TC na gênese da PMP. Os autores também propõem que as rochas de alto Ti da PMP teriam sido originadas por uma fonte sublitosférica metassomatizada por piroxenito.

Uma possibilidade para a origem do vulcanismo da PMP é a de processos de origem rasa com envolvimento da delaminação da base de crosta continental (Lustrino, 2005). Segundo a autora, o encontro de placas continentais geraria o aumento de espessura e reações metamórficas modificariam os minerais e aumentariam a densidade, culminando na delaminação de porções da crosta continental inferior e no mergulho dessas porções no manto superior. O manto astenosférico ascenderia, reagiria metassomaticamente com a crosta inferior delaminada, e ocuparia o volume que foi subtraído. Esse manto seria reativado por processos geológicos e geraria rochas com uma assinatura geoquímica com tendência crustal, como é observado em algumas LIP's.

Anderson (2005) estabelece o “modelo de placa”, que se difere da proposta da pluma principalmente por não focar na alta temperatura, mas sim em processos das placas

tectônicas como esforços tectônicos, heterogeneidade mantélica (gerada, por exemplo, pela delaminação da crosta continental inferior), convecção de pequena escala, variações de fertilidade mantélica (presença de voláteis) e estrutura da litosfera (zonas de fraqueza).

Marques (2008), ao analisar a PMP, as cadeias submarinas Walvis e Rio Grande e da Ilha de TC segundo as características geoquímicas, isotópicas e geocronológicas juntamente com dados geofísicos de tomografia de ondas sísmicas, paleomagnetismo e gravimetria, propõe que essas manifestações vulcânicas foram originadas em processos de fusão mantélica que ocorreram em baixa profundidade, conforme o “modelo de placa” proposto por Anderson (2005).

### 2.2.2 Geoquímica

O vulcanismo ocorrido na PMP é de natureza essencialmente bimodal, uma vez que rochas intermediárias ( $57 < \text{SiO}_2 < 63\%$ ) não são abundantes em comparação com as de natureza básica ( $\text{SiO}_2 < 57\%$ ) e ácida ( $\text{SiO}_2 > 63\%$ ). Isso se deve à escassez de rochas com teores entre 60-64% de  $\text{SiO}_2$ . As rochas vulcânicas da PMP são representadas principalmente por basaltos toleíticos e andesi-basaltos toleíticos, que constituem aproximadamente 90% do volume total de material extrusivo. De modo subordinado, ocorrem andesitos toleíticos e rochas ácidas, representadas principalmente por riodacitos e riolitos (Marques & Ernesto, 2004; Peate *et al.*, 1992)

Os basaltos são divididos em grupos distintos chamados de domínios e se distribuem geograficamente pelos alinhamentos principais que cortam a Bacia do Paraná ao longo dos rios Uruguai e Piquiri, com direção NW-SE. São intitulados domínios Setentrional, Central e Meridional. Essa divisão foi proposta por Bellieni *et al.* (1984), que buscaram relacionar a distribuição geográfica com teores de  $\text{TiO}_2$ , e o trabalho de Mantovani *et al.* (1985), confirmando com teores de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , dividiram a PMP, essencialmente, em: grupo baixo Ti e P (*Low Phosphorus and Titanium* - LPT) com  $\text{TiO}_2 < 2\%$  e  $\text{P}_2\text{O}_5 < 0,35\%$ , no domínio meridional, ao sul do lineamento do Rio Uruguai, e grupo alto-Ti e P (*High Phosphorus and Titanium* - HPT) com  $\text{TiO}_2 > 3\%$  e  $\text{P}_2\text{O}_5 > 0,4\%$ , no domínio setentrional, ao norte do lineamento do Rio Piquiri. A porção central, entre os lineamentos Rio Uruguai e Rio Piquiri tem um comportamento intermediário, com rochas de alto e de baixo  $\text{TiO}_2$ .

Buscando relacionar amostras a tipos definidos de magma e definir características diagnósticas para cada um deles, Peate (1989) e Peate *et al.* (1992) definiram magmas-



tipo baseando-se nos teores e razões entre óxidos e elementos traço, dividindo as rochas basálticas *lato sensu* em seis subgrupos, como mostra a Tabela 1, sendo eles: Gramado, Esmeralda, Ribeira, Paranapanema, Pitanga e Urubici, onde os três primeiros são BTi (Baixo Ti) e os três últimos são ATi (Alto Ti). As rochas riolíticas da PMP foram divididas em dois tipos: Palmas e Chapecó por Piccirillo *et al.* (1988) (Tabela 2).

Tabela 1 - Composição utilizada para definição de magmas-tipo para as rochas basálticas da PMP. Dados resultantes de análise por fluorescência de raios X. Fonte: Peate (1989).

Magmas-tipo HTi (alto TiO <sub>2</sub> )				Magmas-tipo LTi (baixo TiO <sub>2</sub> )		
	Urubici	Pitanga	Paranapanema	Gramado	Esmeralda	Ribeira
TiO <sub>2</sub> (%)	>3,3	>2,9	1,8-3,2	<1,8	1,3-2,2	1,5-2,1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	>0,45	>0,35	0,2-0,7	<0,35	<0,35	0,2-0,4
SiO <sub>2</sub> (%)	>50	47-52	49,0-51,5	>51	50,5-53,0	49,5-51,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3 (t)</sub> (%)	<14,2	>14,0	>13,5	<14,5	13-16	12 - 15
Sr (ppm)	>600	400-600	<430	<430	<250	>250
Ba (ppm)	>450	340-700	<410	<540	<350	250-500
Zr (ppm)	>270	200-440	<250	<250	<200	<170
Sr/Y	>10,5	>10	>10,5	<11	<7	>8
Ba/Y	>11,5	9,0-14,5	4,5-13	7,5-14,5	<8	>8,5
Zr/Y	>7	5,5-8,0	4,5-6,0	4,0-5,5	3,0-4,5	4,0-7,0
Ti/Y	>500	350-700	300-500	<300	<300	300-500
Ti/Zr	>60	>50	>65	<60	>60	>70

Tabela 2 - Composição utilizada para definição de magmas-tipo para as rochas riolíticas da PMP. Dados resultantes de análise por fluorescência de raios X. Fonte: Piccirillo *et al.* (1988).

Riolitos		
	Chapecó	Palmas
TiO <sub>2</sub> (%)	0,9-1,5	0,6-1,1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	>0,3	<0,35
SiO <sub>2</sub> (%)	63-68	65-72
Fe <sub>2</sub> O <sub>3(t)</sub> (%)	—	—
Sr (ppm)	>250	<170
Ba (ppm)	>900	<800
Zr (ppm)	>500	<400

A partir do tratamento de um banco de dados contendo 5605 amostras, Licht & Lima (2014) buscaram limites definidos por tratamento estatístico, sem superposições. A proposta subdivide as rochas da PMP em 16 grupos, baseados na associação de *gaps* de Si-Zr-Ti-P que permitem classificar cada um desses teores em altos (acrescidos pela letra H) e baixos (acrescidos pela letra L) e pode ser visualizada na Figura 6. Na PMP, ocorrem dois tipos principais, classificados como tipo 1 (LSi, LZr, LTi e LP) e tipo 4 (LSi, LZr, HTi e HP) que podem ser empilhados como mostram a Figura 7 e a Figura 8. As rochas do Tipo

1 subdividem-se em Tipo 1 Centro-Norte e Tipo 1 Sul segundo a sua localização geográfica e posição estratigráfica, cada uma com associações geoquímicas únicas.

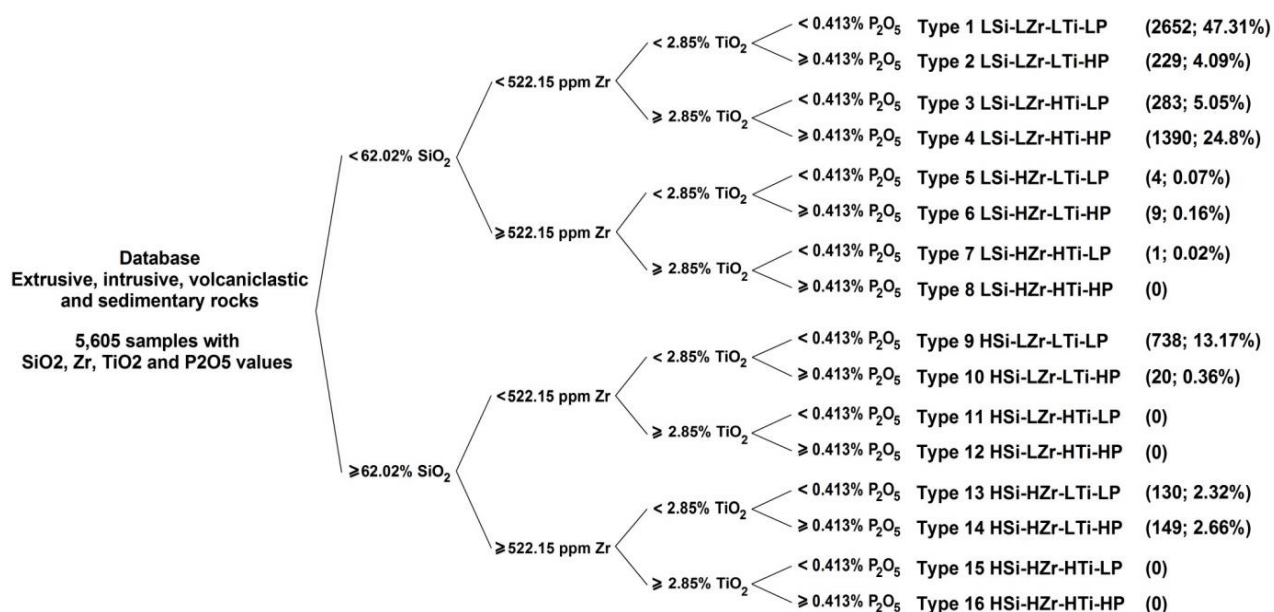


Figura 6 - Associação dos *gaps* Si-Zr-Ti-P para classificar as rochas da PMP. A coluna à direita da nomenclatura dos tipos mostra a quantidade absoluta e relativa de amostras para cada tipo geoquímico. (Licht & Lima, 2014).

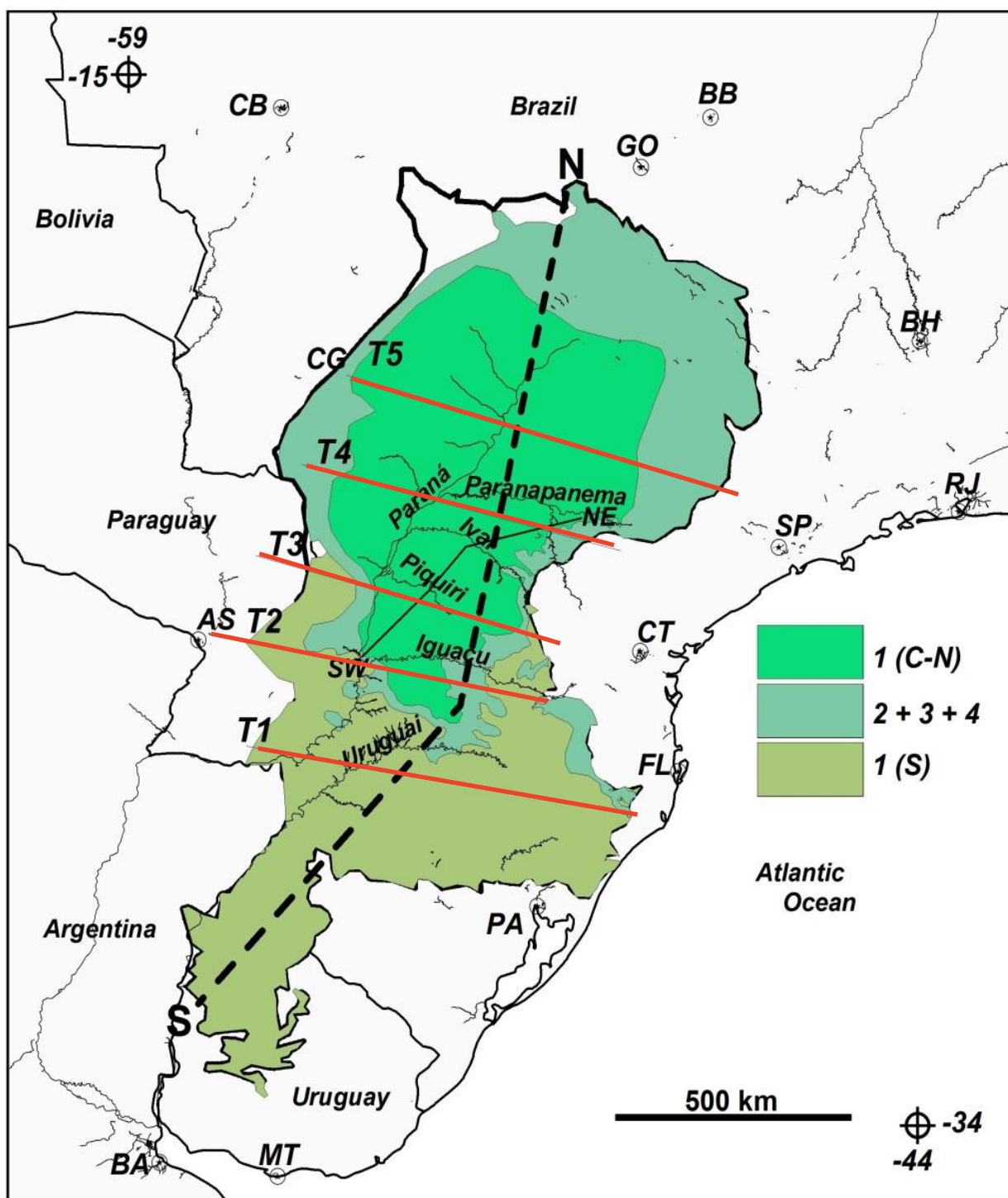


Figura 7 - Variação das tipologias geoquímicas de Licht & Lima (2014) em superfície. As linhas vermelhas representam as direções gerais das seções verticais que são apresentadas na Figura 8. Municípios: AS – Asunción; BA – Buenos Aires; BB – Brasília; BH – Belo Horizonte; CB – Cuiabá; CG – Campo Grande; CT – Curitiba; FL – Florianópolis; GO – Goiânia; MT – Montevideo; PA – Porto Alegre; RJ – Rio de Janeiro; SP – São Paulo. Legenda: Tipo 1 Centro-Norte representado por “1 (C-N)”; Tipo 1 Sul representado por “1(S)”.

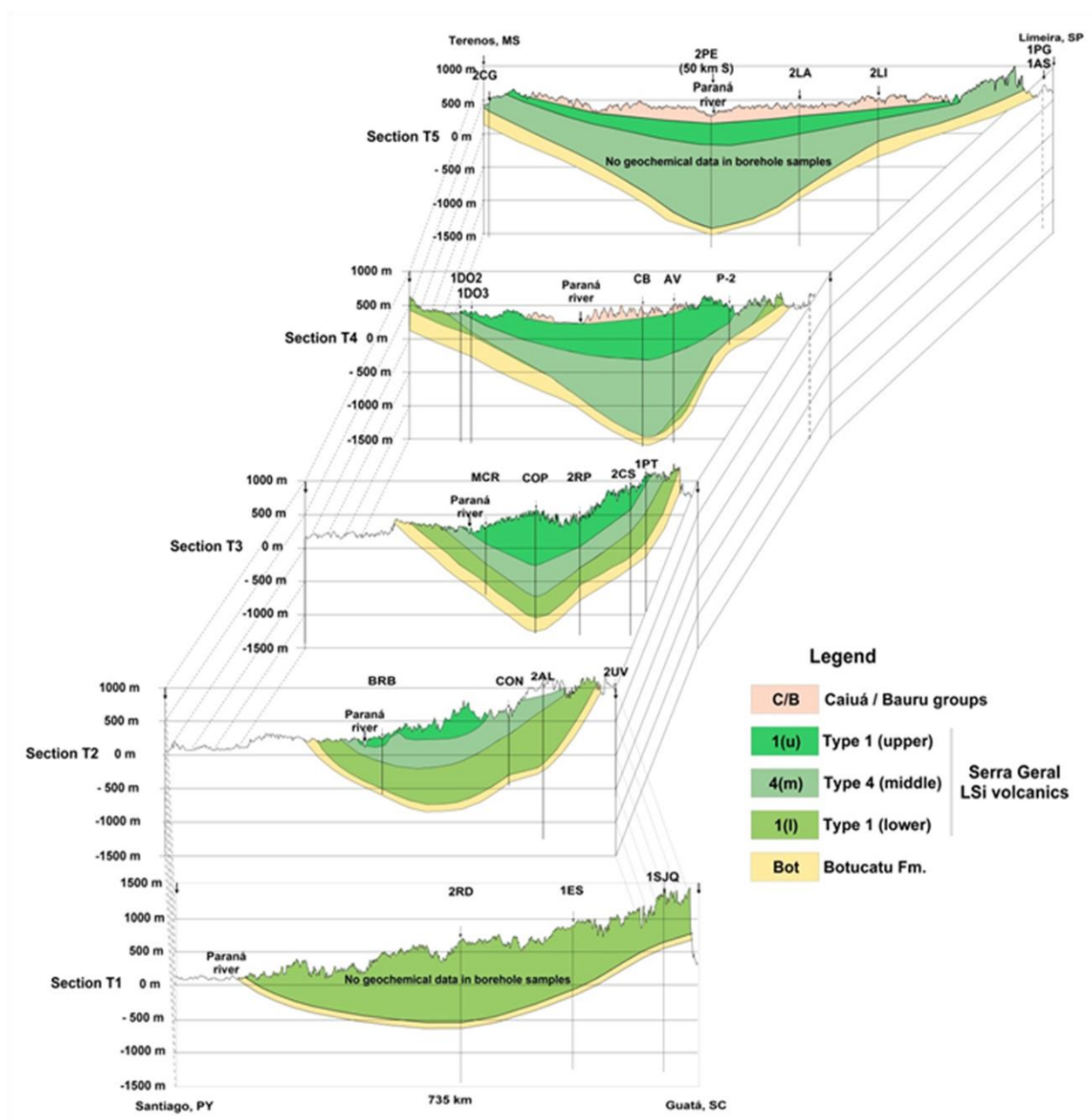


Figura 8 - Seções verticais indicadas pelas linhas vermelhas da Figura 7 (Licht & Lima, 2014). Os códigos dos poços estão indicados no topo das seções.

### 2.2.3 Litoestratigrafia da PMP no SW do Paraná

A individualização das fácies vulcânicas, sedimentares e intrusivas realizada por Arioli & Licht (2013) ao sul do paralelo 24°S no estado do Paraná foi feita a partir do mapeamento faciológico em áreas vulcânicas com base nas seguintes características: geometria e organização interna dos derrames; padrões de vesiculação, estilos de disjunção; preenchimento de cavidades; formas, cores e controles dos produtos de

alteração; características petrográficas; feições de superfície de derrame; características litoquímicas; relações de contato entre derrames e conjuntos de derrames, rochas intrusivas, vulcanoclásticas e sedimentares. Dessa forma, os autores individualizaram 4 formações e 13 membros, detalhados na Tabela 3 e representados na Figura 9.

Tabela 3 - Coluna estratigráfica do sudoeste da PMP, denominado Grupo Serra Geral por Arioli & Licht (2013), com unidades litoestratigráficas e as respectivas associações faciológicas.

<b>Unidades litoestratigráficas</b>	<b>Associações faciológicas</b>
<b>Fm. Covó</b>	Interdigitação de ignimbrito reomórfico, lava ignimbrítica e fluxos de lava com composição de riódacito, quartzo-latito, andesito, riolitos e vitrófiro.
Mb. Guarapuava	Ignimbrito reomórfico com composição de riódacitos, quartzo-latito, andesito, riolitos, brecha de fluxo e vitrófiro.
Mb. Palmas	Ignimbrito reomórfico, lava ignimbrítica e fluxos de lava de composição riolítica.
<b>Fm. Candói</b>	Derrames tabulares de basalto cinza com entablamento sigmoidal e disjunção hexagonal na base e no topo, variando lateralmente a lobos tabulares de basalto hipohialino cinza-escuro e basalto cloritizado cinza-esverdeado.
Mb. Três Pinheiros	Derrames tabulares de basalto hipohialino com entablamento em leque e em bloco, recobrem localmente basaltos Foz do Areia e Ivaiporã, intercalam-se a basaltos e brechas do Mb. Cantagalo, na Fm. Barracão.
Mb. Foz do Areia	Derrames tabulares espessos de basalto fanerítico cinza, sem evidências de hidrotermalismo, zona vesicular de topo delgada e descontínua, com preenchimentos de quartzo, calcita e zeólita, disjunção colunar e entablamento sigmoidal bem desenvolvidos, com níveis de brecha hidrovulcanoclástica somente na base da sequência.
Mb. Ivaiporã	Intercalação de derrames tabulares e lobados de basalto fanerítico cinza com níveis isolados de brecha hidrovulcanoclástica.
Mb. General Carneiro	Intercalação de derrames tabulares e lobados de basalto fanerítico cinza com níveis isolados de brecha hidrovulcanoclástica.
Mb. Chopinzinho	Derrames tabulares com estrutura interna com cona de topo de basalto hipohialino com disjunção colunar fina recobrimdo geodos de ametista e núcleo de basalto fanerítico cloritizado. Intercalações de brecha peperítica.
<b>Fm. Barracão</b>	Derrames tabulares e lobados de basaltos avermelhados (oxidação pervasiva) com abundantes intercalações de rochas vulcanoclásticas e sedimentares.
Mb. Flor da Serra do Sul	Derrames tabulares de ferro-basalto roxo-esverdeado com entablamento em cunha, sigmoidal e tetragonal, intercalados a brecha vulcanoclástica.
Mb. Cantagalo	Intercalação de derrames lobados de basalto vesicular, com abundantes brechas de fluxo cimentadas por sílica e calcita, brechas vulcanoclásticas, arenito conglomerático de grânulos, arenito fino a siltico e siltito.
Mb. Salgado Filho	Intercalação de derrames lobados de basalto vesicular, brechas vulcanoclásticas, arenito fino a siltico e siltito.
<b>Fm. Cascavel</b>	Derrames lobados, lobos tabulares e derrames tabulares de basalto avermelhado, com intercalações vulcanoclásticas e sedimentares diminuindo em proporção da base para o topo da sequência.
Mb. Toledo	Derrames tabulares de ferro-basalto cinza-arroxado com entablamento em cunha, sigmoidal e disjunção mais comumente tetragonal, intercalados a brecha hidrovulcanoclástica, arenito e lobos de basalto cinza.
Mb. Santa Quitéria	Lobos tabulares e derrames lobados de basalto vesicular intercalados a brechas vulcanoclásticas, tufo e sedimentos terrígenos.
Mb. Foz do Iguaçu	Lobos tabulares e derrames tabulares de basalto cinza intercalados a raros níveis de tufo e arenito.



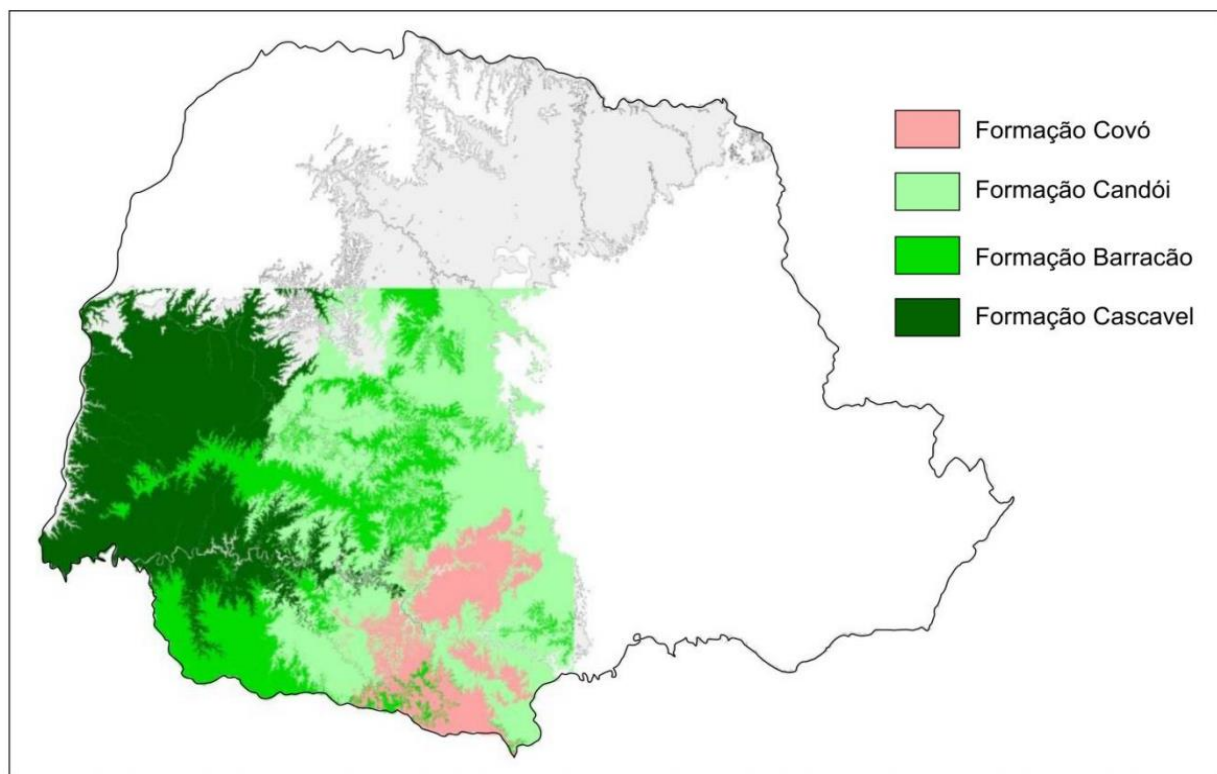


Figura 9 - Distribuição regional das formações Covó, Candói, Barracão e Cascavel, de acordo com Arioli & Licht (2013).

De acordo com Arioli & Licht (2013), a estratigrafia encontra-se em aperfeiçoamento, visto que alguns fatores interferem negativamente na construção de uma coluna estratigráfica para a PMP, como: a escassez de níveis-guia que permitam controlar a posição relativa de conjuntos de derrames ou, eventualmente, derrames individuais; a necessidade de uma escala de detalhe adequada e a extensão da área, visto que se trata de uma região extensa; a abundância de interdigitações observadas entre praticamente todas as unidades mapeadas, dificultando o estabelecimento de uma sequência estratigráfica única para a PMP; a dificuldade em distinguir feições geradas pelas propriedades reológicas dos materiais vulcânicos e pela influência de fatores ambientais e a pobreza de feições de afloramento que permitam identificar os eventos tectônicos sin-vulcânicos e pós-vulcânicos.

Devido à complexidade típica das áreas vulcânicas e pela dificuldade ou impossibilidade de correlacionar unidades equivalentes expostas em áreas distantes, foram identificadas as relações estratigráficas apenas entre formações adjacentes. Quando essas unidades se repetem, são nomeadas como unidades diferentes independentemente de serem litologicamente semelhantes (Arioli & Licht, 2013).

Buscando classificar os afloramentos estudados em Barracão e Capanema, com base na classificação de Arioli & Licht (2013), ambos os afloramentos são inseridos na

Formação Barracão, sendo o de Barracão inserido no Membro Flor da Serra do Sul (Figura 10) e o de Capanema inserido no Membro Salgado Filho, ambas pertencendo ao Grupo Serra Geral (Porção da PMP ao sul do paralelo 24°S).

Segundo Arioli & Licht (2013), o Mb. Flor da Serra do Sul situa-se ao longo do divisor d'água das bacias dos rios Iguaçu e Chapecó, entre as localidades de Barracão e Clevelândia, e estende-se para sul no território de Santa Catarina. Este Mb. recobre o Mb. Salgado Filho e forma derrames individuais com espessuras de até 20-30 m e continuidade lateral de até dezenas de quilômetros.

É constituído por dois a quatro derrames tabulares com entablamento em cunha, de ferro-basalto, com delgadas intercalações de brecha hidrovulcanoclástica e hidrotufo fino, laminado. O basalto representa aproximadamente 95% da espessura da sequência, constituindo as intercalações vulcanoclásticas e sedimentares os restantes 5%. Petrograficamente, o basalto é semelhante ao do Membro Salgado Filho, diferindo pela ausência dos termos afaníticos, nos afloramentos analisados, e pelo baixo grau de vesiculação. Caracteriza-se pelas feições: zona de topo microvesicular, entablamento em cunha, disjunção tetragonal e pegmatitos básicos (Arioli & Licht, 2013).

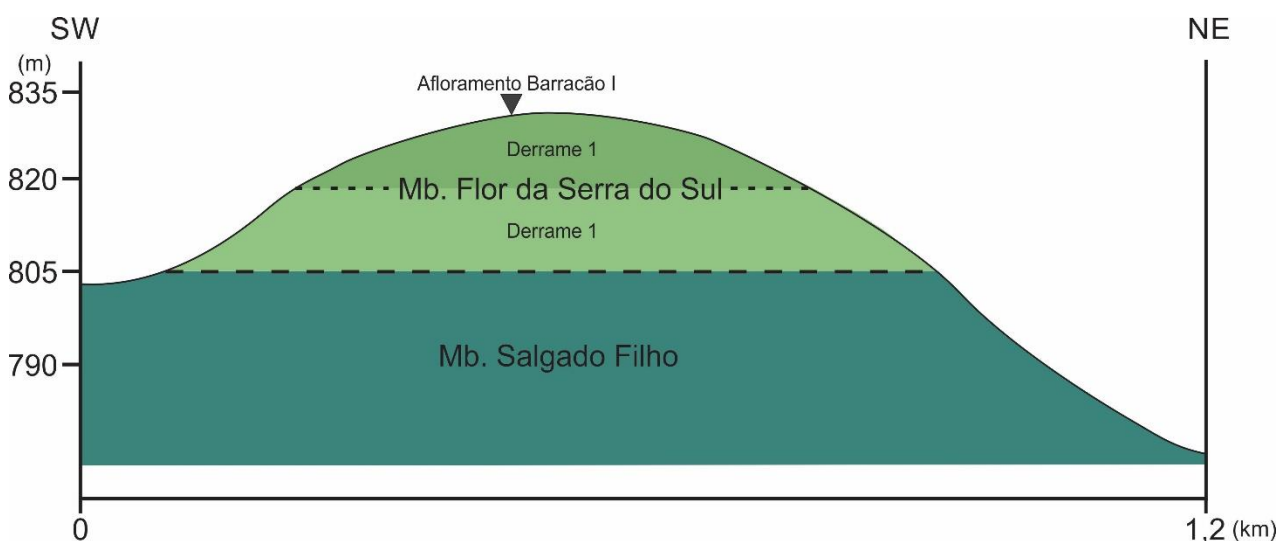


Figura 10 - Seção geológica ilustrativa de Barracão, com base nos pontos recuperados da base de dados de Arioli & Licht (2013), demarcado o afloramento com ocorrência de pegmatitos básicos. As altitudes foram tiradas com GPS e os contatos são controlados na encosta, sendo inferidos para dentro do maciço.

O Membro Salgado Filho é a unidade mais basal da Formação Barracão e aflora na região sudoeste do Paraná, balizada pelas fronteiras com Santa Catarina e Argentina, a sul e oeste, respectivamente, e pelo vale do rio Iguaçu, a norte, estendendo-se até as imediações da cidade de Francisco Beltrão, a leste. Mapeado entre as cotas de 400 m, ao nível da foz do rio Iguaçu, e 1.100 m na região de Salgado Filho, a espessura exposta do

Membro Salgado Filho é estimada em 700 m. É constituído por uma sequência de derrames lobados com abundantes intercalações de brechas vulcanoclásticas, menos abundantemente brechas de fluxo e tufos. Os lobos de basalto vesicular apresentam seção lenticular em grande parte dos afloramentos, mesmo nas porções mais espessas, em que a estrutura da rocha se torna maciça (Arioli & Licht, 2013).

#### **2.2.4 Arquitetura de derrames**

Aspectos físicos do vulcanismo da PMP restringem-se a poucos trabalhos, normalmente como desdobramentos de outras investigações ou como descrições locais. A análise de feições litológicas e estruturais pode indicar condições de resfriamento, de paleorrelevo, questões composicionais, dentre outros. Sua importância é indiscutível, pois é necessário ter uma faciologia detalhada para fornecer as condicionantes de um arcabouço geológico para que seja possível associar com a estratigrafia geoquímica. No trabalho realizado por Arioli & Licht (2013) são descritos registros de feições litológicas e estruturais relacionadas com os seguintes processos: resfriamento, fluxo, inflação, cristalização e segregação magmática (Tabela 4). O modelo de derrame utilizado foi o de derrame tabular, devido à predominante presença dessas feições nesse tipo de derrames. Nessa classificação, o processo de segregação e diferenciação magmática contempla os pegmatitos básicos, que são tratados no presente trabalho.



Tabela 4 - Processos e seus resultados observados na PMP. Fonte: Arioli &amp; Licht (2013).

<b>Processos</b>	<b>Feições litológicas e estruturais</b>
<b>Resfriamento</b>	Zonalidade interna Disjunção colunar Entablamento
<b>Fluxo</b>	Disjunção tabular sigmoidal Vesículas inclinadas Brechas vulcanoclásticas Brechas autoclásticas Brechas de topo
<b>Inflação</b>	Juntas de inflação Disjunção tabular Variações composicionais Dobras Arqueamentos
<b>Cristalização</b>	Variações texturais Minerais primários Minerais secundários Glóbulos de vidro Preenchimento de cavidades e fraturas Geodos
<b>Segregação e diferenciação magmática</b>	Espiráculos Soleiras internas Pegmatitos básicos Granófiros e riolitos

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

O levantamento bibliográfico foi realizado por meio da consulta de artigos, livros e outras fontes científicas, começando por aqueles que fazem referências à Bacia do Paraná, contemplando: histórico, distribuição geográfica, evolução e registro estratigráfico; e à PMP, contemplando histórico, distribuição geográfica, faciologia litogeoquímica, arquitetura interna dos derrames e feições associadas. Em seguida, foram consultadas as referências que se dedicam ao estudo dos pegmatitos básicos e as associações entre eles e suas encaixantes. Como apoio à pesquisa buscou-se referências de suporte, visando à caracterização petrográfica e geoquímica e interpretação dos dados geoquímicos. Também foram consultados registros de análogos internacionais para sugerir possíveis propostas de formação dos pegmatitos básicos.

#### 3.2 AQUISIÇÃO DOS DADOS

##### 3.2.1 Seleção dos Afloramentos

Para seleção dos afloramentos, foram consultados diversos trabalhos, destacando-se o de Vasconcellos *et al.* (2001), onde foi publicado o mapa de localização dos principais pegmatitos básicos descritos na PMP, no sudoeste do Paraná. Assim, foram escolhidos 2 afloramentos principais e 2 afloramentos de suporte, levando em conta a localização e acesso, qualidade dos afloramentos, possibilidades de produção de dados inéditos e interesse científico de detalhamento. O acesso aos afloramentos foi disponibilizado pela MINEROPAR (Serviço Geológico do Paraná), responsável pela logística dos trabalhos de campo.

##### 3.2.2 Trabalhos de Campo e Amostragem

Os trabalhos de campo foram realizados visando a seleção das exposições de pegmatitos básicos a serem estudados, a descrição das rochas, a delimitação da arquitetura desses corpos nos derrames e o contato com a rocha hospedeira. Nesta etapa,

inclui-se também coleta, descrição e indexação de amostras de rocha para constituir um acervo representativo das rochas da PMP na área de estudo.

Os trabalhos de campo foram realizados em duas etapas, sendo a primeira entre os dias 21 a 25 de julho de 2014 e a segunda entre os dias 23 a 26 de fevereiro de 2015. Foram descritos e amostrados 4 afloramentos, divididos em dois grupos: Capanema e Barracão. As amostras foram separadas pelas siglas CA (Capanema), BA (Barracão afloramento 1), BB (Barracão afloramento 2) e PR (Pedreira Barracão), acrescidas de um número para identificação. Destes afloramentos foram coletadas, respectivamente, 30, 20, 10 e 10 amostras, totalizando 70 amostras.

### 3.2.3 Análise Petrográfica

Foram descritas 29 lâminas petrográficas, 16 de pegmatitos e 13 de basaltos, sendo 4 destas do contato entre estas duas rochas. A descrição teve como objetivo possibilitar a caracterização textural e estrutural, identificar a assembleia mineral e gerações de cristalização, observar o tipo de contato entre o pegmatito básico e a encaixante, e definir a porcentagem modal estimada visualmente das espécies minerais. As abreviaturas de nomes dos minerais nas fotomicrografias seguiu a proposta de Whitney & Evans (2010). As seções delgadas foram confeccionadas no Laboratório de Laminação Petrográfica (LAMIN) do Departamento de Geologia, pertencente à Universidade Federal do Paraná (UFPR).

As seções foram analisadas em luz transmitida em microscópio binocular de polarização da marca Zeiss, modelo Imager.A2. As imagens foram capturadas utilizando o software AxioVision - Zeiss. Os equipamentos utilizados são do Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) do Departamento de Geologia, da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

### 3.2.4 Análises por Fluorescência de raios X (FRX)

A técnica de Fluorescência de raios X (FRX) é uma técnica analítica multielementar e não destrutiva usada para obter informações de composição elementar qualitativas e quantitativas. O método baseia-se em excitar a amostra por uma fonte primária de radiação e detectar a radiação emitida com diferentes comprimentos de ondas dados diferentes elementos, sendo possível detectar e identificar os elementos. A

intensidade dos raios X fluorescentes é proporcional à concentração desses elementos, sendo assim passíveis de serem quantificados (LFNATEC, 2004).

Nesta pesquisa, a técnica de FRX foi usada para análise dos óxidos  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  total,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$  por meio de pérola fundida (análise quantitativa) para classificar e estabelecer a assinatura geoquímica de pegmatitos e encaixantes, realizar a comparação entre eles e entender os processos de formação dessas rochas. As análises foram realizadas no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná e os resultados encontram-se no Apêndice 3; os limites de detecção encontram-se no Apêndice 2; a preparação das amostras está detalhada no Apêndice 1.

### 3.2.5 Análises por Espectrometria de Massa por Plasma com Indução Acoplada (ICP – MS)

A técnica consiste na solubilização e transformação das amostras em um aerossol, que então é varrido para o plasma com indução acoplada para ionização. É usado um espectrômetro de massa para separar e um detector para quantificar os íons (PerkinElmer, 2011). A análise por ICP-MS foi realizada pelo Bureau Veritas Minerals Laboratories e foi utilizada para obter os teores de elementos terras raras (ETR) (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb e Lu) e demais elementos traço (Ag, As, Au, Ba, Be, Bi, Co, Cs, Cu, Ga, Hf, Hg, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sb, Se, Sn, Sr, Ta, Th, Tl, U, V, W, Y, Zn e Zr). Foi utilizado a digestão das amostras por água régia para os elementos Ag, As, Au, B, Cd, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Tl e Zn e por fusão usando metaborato e tetraborato de lítio para abertura dos demais elementos. Os limites de detecção encontram-se no Apêndice 2 e os resultados analíticos encontram-se no Apêndice 3.

### 3.2.6 Análises por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O MEV foi utilizado para caracterização morfológica dos minerais, principalmente os minerais opacos (magnetita e ilmenita). Associado à espectroscopia por dispersão de energia (EDS), buscou-se observar variações químicas dentro de cada cristal. O MEV utilizado é da marca Jeol, modelo 6010LA; o detector de EDS utilizado é da marca Jeol modelo EX-94410T1L11. Os equipamentos utilizados são do LAMIR – UFPR.

### 3.3 TRATAMENTO DOS DADOS

#### 3.3.1 Interpretação dos dados geoquímicos

Os dados geoquímicos para óxidos foram estudados a partir de diagramas de classificação para caracterização das rochas e interpretação das séries evolutivas. Os dados foram tratados no *software* geoquímico GcdKit (*Geo Chemical Data Tool - Kit*), devidamente corrigidos em base anidra para aqueles diagramas onde se faz necessária a correção. Os diagramas de classificação utilizados são o AFM ( $[\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}] \times [\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3] \times \text{MgO}$ ) de Irvine & Baragar (1971), diagrama (Al x  $[\text{Fe}_{\text{total}} + \text{Ti}] \times \text{Mg}$ ) de Jensen (1976), o TAS ( $[\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}] \times \text{SiO}_2$ ) de Le Maitre *et al.* (1989), e o  $\text{R}_1\text{R}_2$  [ $\text{R}_1=4\text{Si}-11(\text{Na}+\text{K}) - 2(\text{Fe}+\text{Ti})$  x  $\text{R}_2=6\text{Ca}+2\text{Mg}+\text{Al}$ ], de De La Roche *et al.* (1980).

Foram utilizados diagramas de variação do tipo Fenner para os óxidos, tendo o MgO como óxido discriminante, para avaliar o comportamento geoquímico e o grau evolutivo das porções pegmatíticas e da encaixante. Foram utilizados diagramas multielementares para os ETR e demais elementos traço, normalizados pelo manto primordial e condrito, respectivamente segundo Wood *et al.* (1979) e McDonough & Sun (1995)

Para separação do  $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{total})}$ , foram usadas as razões de 0,2 e 0,3 recomendadas por Middlemost (1989) ao plotar as rochas no diagrama TAS ( $[\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}] \times \text{SiO}_2$ ) de Le Maitre *et al.* (1989) para o cálculo de FeO e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Os valores dos minerais normativos foram calculados em base anidra pela norma CIPW e apresentados em porcentagem no Apêndice 3.

#### 4 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

As áreas de estudo localizam-se na região sudoeste do estado do Paraná, nos municípios de Capanema e Barracão, ambas a aproximadamente 560 km de Curitiba e aproximadamente 80 km entre elas. As áreas estão inseridas no Terceiro Planalto Paranaense e os afloramentos estudados são formados por derrames vulcânicos com pegmatitos básicos encaixados. As coordenadas dos pontos estudados encontram-se listadas na Tabela 5.

O acesso principal às áreas de estudo é feito pela BR-277, a partir de Curitiba, no sentido Foz do Iguaçu até Cascavel. Em seguida, percorre-se a PR-163 até a Rua Santa Catarina, dentro da cidade de Capanema. Após seguir por 450 metros, segue-se pela Avenida Mauá até chegar na perpendicular Avenida Rio Grande do Sul e segue-se pela Travessa 7 por cerca de 100 m até a Pedreira da Prefeitura de Capanema (Figura 11).

Para chegar aos afloramentos de Barracão, segue-se a BR-163. Dentro da cidade de Barracão, continua-se na BR-163 em direção ao município Flor da Serra do Sul até a rotatória de acesso a Porto Seco, seguindo para sul. O afloramento encontra-se a aproximadamente 20 metros, na divisão com o município catarinense de Dionísio Cerqueira. Foi observado também, a 200 metros, continuando na mesma via, um afloramento em pedreira desativada. Prosseguindo pelo acesso a Porto Seco, segue-se até a Av. Rio Branco, à direita, e avança 560 m até uma pedreira de brita, identificada como Pedreira Barracão (Rebelatto), que também foi analisada (Figura 12).

Tabela 5 - Coordenadas dos afloramentos estudados.

Identificação	Coordenadas Geográficas WGS 84	
Afloramento Capanema	25°40'51.91"S	53°48'41.43"O
Afloramento Barracão I	26°15'30.15"S	53°37'7.90"O
Afloramento Barracão II	26°15'36.18"S	53°37'10.38"O
Pedreira Barracão (Rebelatto)	26°16'23.20"S	53°38'28.35"O



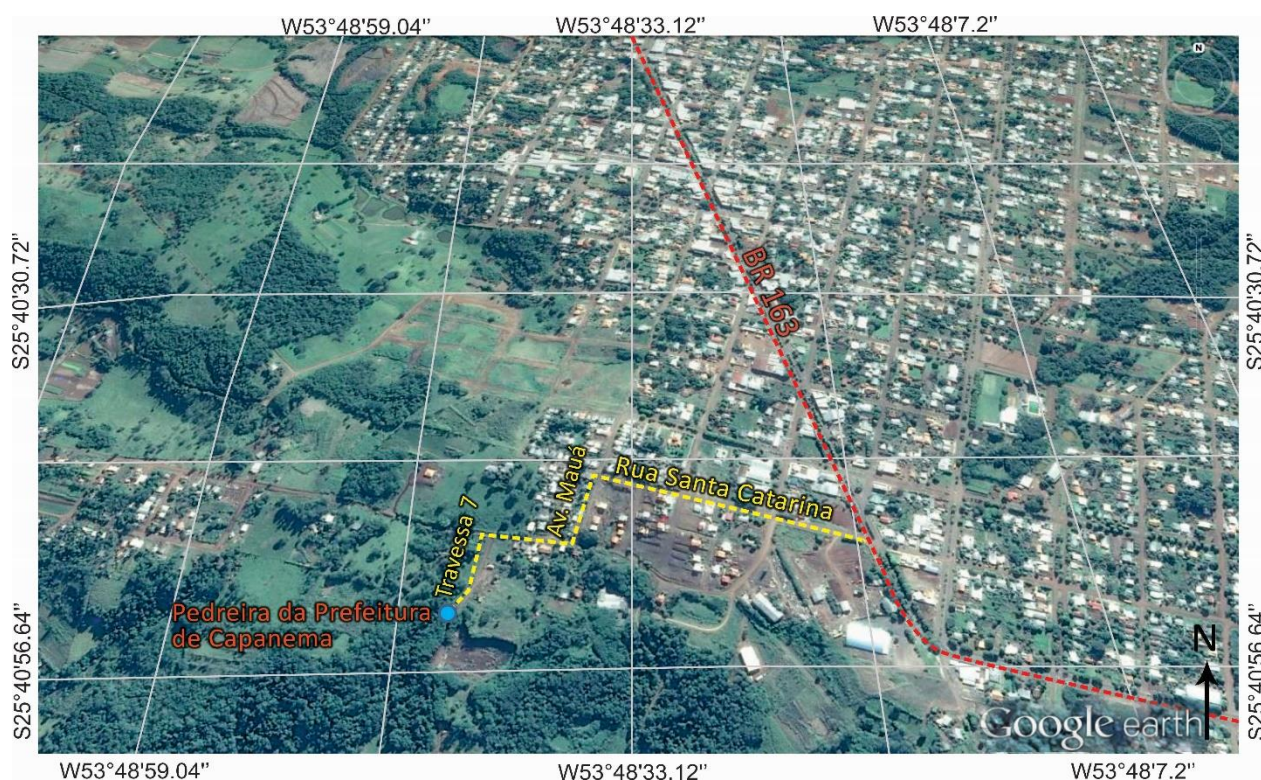


Figura 11 - Localização dos pontos de estudo em Capanema e estradas de acesso. Imagem do Google Earth obtida em 25 de abril de 2015.



Figura 12 - Localização dos pontos de estudo em Barracão e estradas de acesso. Imagem do Google Earth obtida em 25 de abril de 2015.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 APRESENTAÇÃO DO ARTIGO

O corpo da dissertação será composto pelo artigo a ser submetido à Revista Geociências do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista (UNESP)/Campus de Rio Claro intitulado: “*RELAÇÕES TEMPORAIS, PETROLÓGICAS E GEOQUÍMICAS ENTRE PEGMATITOS BÁSICOS E BASALTOS ENCAIXANTES DA PROVÍNCIA MAGMÁTICA DO PARANÁ NO SUDOESTE DO PARANÁ*”, apresentado como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Geologia, no Programa de Pós-Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.



**RELAÇÕES TEMPORAIS, PETROLÓGICAS E GEOQUÍMICAS ENTRE PEGMATITOS BÁSICOS E BASALTOS ENCAIXANTES DA PROVÍNCIA MAGMÁTICA DO PARANÁ NO SUDOESTE DO PARANÁ.**

**TIME, PETROLOGICAL AND GEOCHEMICAL RELATIONSHIPS BETWEEN BASIC PEGMATITES AND HOST BASALTS OF THE PARANA MAGMATIC PROVINCE IN SOUTHWESTERN PARANÁ.**

*Jan Savaris SOARES<sup>1</sup>; Eleonora Maria Gouvêa VASCONCELLOS<sup>2</sup>; Cristina Valle PINTO-COELHO<sup>3</sup>*

(1) Programa de Pós-Graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná – UFPR. Av. Cel. Francisco Heráclito dos Santos, 210, Centro Politécnico Jardim das Américas, CEP 81531-980. Curitiba, PR. Endereço Eletrônico: jansavaris@hotmail.com

(2) Laboratório de Análise de Minerais e Rochas, Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná – UFPR. Av. Cel. Francisco Heráclito dos Santos, 210, Centro Politécnico Jardim das Américas, CEP 81531-980. Curitiba, PR. Endereço Eletrônico: eleonora@ufpr.br

(3) Programa de Pós-Graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná – UFPR. Av. Cel. Francisco Heráclito dos Santos, 210, Centro Politécnico Jardim das Américas, CEP 81531-980. Curitiba, PR. Endereço Eletrônico: cristinavpc@ufpr.br

Introdução

Inflação e Pegmatitos básicos

Geologia Local

Materiais e Métodos

Análise Petrográfica

Pegmatitos básicos

Basaltos

Análise Geoquímica

Discussão e Conclusões

Agradecimentos

Referências

## RESUMO

Processos de segregação e diferenciação magmática, com migração de fluidos para porções intermediárias de derrames inflados do tipo *pahoehoe* e preenchimento de zonas de menor pressão, formam corpos horizontalizados (lençóis) ou verticalizados (cilindros) com diferenças petrológicas e geoquímicas, chamados de pegmatitos básicos. Nos municípios de Capanema e Barracão, no sudoeste do Paraná, a assembleia mineral das encaixantes e pegmatitos é semelhante: labradorita, augita, minerais opacos e, subordinadamente, clorita, hidróxidos de ferro, argilominerais, apatita, vidro vulcânico e, em Capanema, celadonita. Os pegmatitos têm cristais cerca de cinco a vinte vezes maiores que os basaltos e feições características de resfriamento rápido. Geoquimicamente, os pegmatitos representam rochas evoluídas, com enriquecimento em  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{total}}$ , elementos incompatíveis e ETR e empobrecimento em  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  com relação aos basaltos. Os teores de Sr separam as rochas das duas ocorrências e os de K, Rb, Y e ETRP separam as encaixantes dos pegmatitos. Em Barracão, os valores de óxidos e elementos traço têm maior dispersão e gradam da encaixante mais primitiva ao pegmatito mais evoluído enquanto em

Capanema há dois grupos distintos que indicam que as segregações de Capanema são mais diferenciadas das suas encaixantes.

Palavras-chave: Cristalização Fracionada. Pegmatitos básicos. Província Magmática do Paraná.

### ABSTRACT

Segregation and magmatic differentiation processes associated with fluid migration and filling of lower pressure zones in the core of inflated *pahoehoe* flows form horizontal (sheets) or vertical (cylinders) structures, called basic pegmatites, with petrological and geochemical differences compared the host rocks. In Capanema and Barracão, southwestern of Paraná, the mineral assembly of host rocks and pegmatite is similar: labradorite, augite, opaque minerals and, subordinately, chlorite, iron hydroxides, clay minerals, apatite, volcanic glass and, in Capanema, celadonite. The pegmatites have crystals from five to twenty times bigger than basalts and exhibit exclusive petrographic features of rapid cooling. In geochemical analyzes, pegmatites represent evolved rocks enriched in  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{total}}$ , incompatible elements and REE and depleted in  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  compared to basalts. Sr contents divide the rocks of the two occurrences and the concentrations of K, Rb, Y and HREE separate the host rocks from the pegmatites. In Barracão, the values of the oxides and trace elements have greater dispersion and gradate from the most primitive host rock to the more evolved pegmatite while in Capanema there are two distinct groups indicating that the segregations of Capanema are more differentiated from its host rocks.

Keywords: Fractional Crystallization. Basic Pegmatites. Paraná Magmatic Province.

## INTRODUÇÃO

A Província Magmática do Paraná (PMP) é o resultado de uma série de episódios magmáticos que materializa o fendilhamento e posterior fragmentação do megacontinente Gondwana, ocorrido no Eocretáceo, que acarretou na formação do Oceano Atlântico Sul.

O magmatismo basáltico da PMP é composto predominantemente por derrames do tipo *pahoehoe*, controlados por injeção contínua de lava e inflados. São características desse tipo de derrame, segundo Macdonald (1953) e Self *et al.* (1997), baixas taxas de erupção de avanço lento, de caráter pouco explosivo, com baixa perda de calor, formando superfícies lisas, em cordas ou onduladas.

Dentre os extensos derrames da PMP, processos de resfriamento, fluxo, inflação, cristalização e segregação e diferenciação magmática, descritos por Arioli & Licht (2013) no sudoeste do Paraná, condicionam a geração de heterogeneidades que implicam no registro de feições litológicas e estruturais.

Nos municípios de Barracão e Capanema, foram reconhecidos e estudados afloramentos onde o processo de segregação e diferenciação magmática é responsável pela formação dos pegmatitos básicos. Essas estruturas diferenciam-se principalmente por constituírem-se de cristais maiores do que aqueles presentes nas rochas hospedeiras, com feições intracristalinas e anomalias geoquímicas únicas. Por meio do mapeamento dos pegmatitos básicos é possível refinar a estratigrafia geoquímica, identificando essas variações intraderrames para validar possíveis anomalias e compreender processos tardios associados à formação das rochas da PMP.

## INFLAÇÃO E PEGMATITOS BÁSICOS

Nos derrames do tipo *pahoehoe*, o processo de inflação, esquematizado por Self *et al.* (1998 e 1997), ocorre quando as bordas de topo e base se constituem por uma crosta rígida, com vesículas apreendidas pelo rápido resfriamento, uma camada viscoelástica intermediária e um interior

composto por um material viscoso com bolhas ascendendo ao topo, bloqueadas pela camada solidificada subjacente.

Com a injeção contínua de lava, é conservada a temperatura elevada no interior e ocorre o soerguimento da crosta, a possível ruptura e o avanço do derrame horizontalmente, formando novas frentes, e verticalmente aumentando sua espessura (Figura 13a e b).

Quando a injeção de lava termina e o processo de inflação estagna-se, a temperatura do líquido no núcleo diminui e ocorrem processos que levam à concentração de líquidos diferenciados, geneticamente relacionados à rocha encaixante, que formam corpos verticais (cilindros) e que, ao encontrar uma camada rígida superior, podem se horizontalizar (lençóis), e são denominados de pegmatitos básicos (Figura 13c e d).

O que caracteriza os pegmatitos básicos visualmente é o tamanho dos cristais em contrapartida com os cristais menores da encaixante, geralmente em contato abrupto. A assembleia mineral demonstra semelhança à encaixante sugerindo uma derivação, diferenciando-se pelos cristais com feições características de rápido resfriamento, como aquelas descritas por Hartley & Thordarson (2009) e Puffer & Horter (1993), como texturas esqueletais, agregados de augita em leques, intercrescimento gráfico e/ou simplectítico e zoneamento composicional, bem como a presença de vidro vulcânico. Geoquimicamente são mais evoluídos e ocorrem em derrames preferencialmente espessos ou, menos comum, em intrusões como observado por Walker (1953).

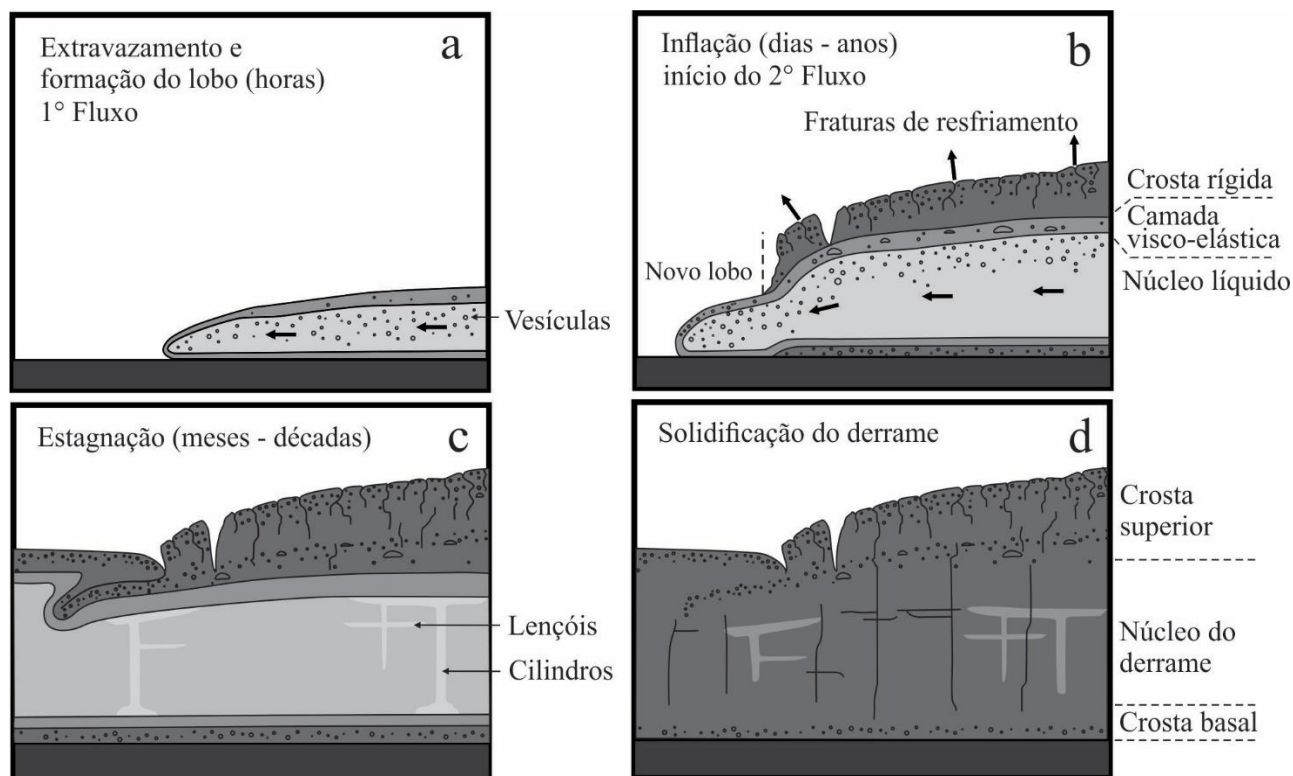


Figura 13 - Modelo de inflação. (a) Início do fluxo de lava; (b) a injeção contínua de lava gera inflação, soerguimento e quebras, além do avanço do derrame; (c) sem injeção de lava, o derrame começa a solidificar e líquidos residuais acomodam-se verticalmente (cilindros) e horizontalmente (lençóis); (d) derrame já solidificado, com padrão de fraturas irregular no topo e colunar e plana no centro. Adaptado de Self *et al.*, 1997.

Com a evolução do termo, esses corpos vêm sendo nomeados, segundo vários critérios, como o processo de gênese, termos descritivos e composicionais. Dentre esses nomes estão: pegmatitoides (termo já obsoleto usado por Lacroix, 1929; Dunham, 1933; Santin, 1969), diferenciados pegmatíticos por Walker (1953), pegmatitos máficos por Greenough & Dostal (1992) e Kontak *et al.* (2002), segregações pegmatíticas por Puffer & Horter (1993), gabro-doleritos pegmatíticos por Jefferson *et al.* (1994), segregações magmáticas pegmatíticas por Phillpots *et al.* (1996), gabros por Vasconcellos *et al.* (2001) e gabros pegmatoides/pegmatitos básicos por Arioli (2008). Os dois últimos em trabalhos pioneiros nacionais. Goff (1996), Self *et al.* (1998) e Hartley & Thordarson

(2009) separam a classificação em corpos verticais (gerando os cilindros vesiculares ou *Vesicle Cylinders*) e em horizontais (gerando os lençóis vesiculares ou *Vesicle Sheets*).

Há várias hipóteses para a formação dos pegmatitos básicos, as quais buscam explicar a colocação deles no interior do derrame, a existência de cristais gigantes e a razão de serem diferenciados das encaixantes.

Santin (1969) descreveu os pegmatitos formados em derrames espessos nas Ilhas Canárias e publicou três hipóteses para a formação desses corpos. A primeira delas, e a mais frequente de acordo com o autor, decorre da intrusão de um magma mais alcalino e rico em voláteis no basalto ainda em formação. A segunda, responsável por diferenciações locais, ocorre pela cristalização de líquidos residuais do mesmo magma basáltico formador dos basaltos encaixantes. A terceira, e menos frequente, é descrita pela contribuição de fluidos alcalinos e substituição metassomática.

De acordo com Puffer & Horter (1993), ao estudar o *Columbia River Basalt Group* (EUA), a formação de pegmatitos básicos ocorre pela migração de líquidos residuais por meio de bolhas de porções inferiores que, ao atravessarem a zona central de maior temperatura do derrame, têm os núcleos cristalinos do líquido fundidos, diminuindo a densidade de nucleação, a viscosidade e facilitando a difusão de íons durante a cristalização, formando grandes cristais de crescimento rápido e esqueletais. Ao atingir a região superior mais resfriada, a mistura de cristais e líquido é barrada e acumula-se horizontalmente caso ela seja impermeável. Episódios posteriores de fraturamento descendente da barreira superior faz com que a porção líquida da fase parcialmente cristalizada seja degaseificada e rapidamente resfriada (*quench*), formando vidro e cristais menores em meio aos cristais maiores decorrentes do episódio de menor nucleação, maior pressão e maior difusão (Figura 14).

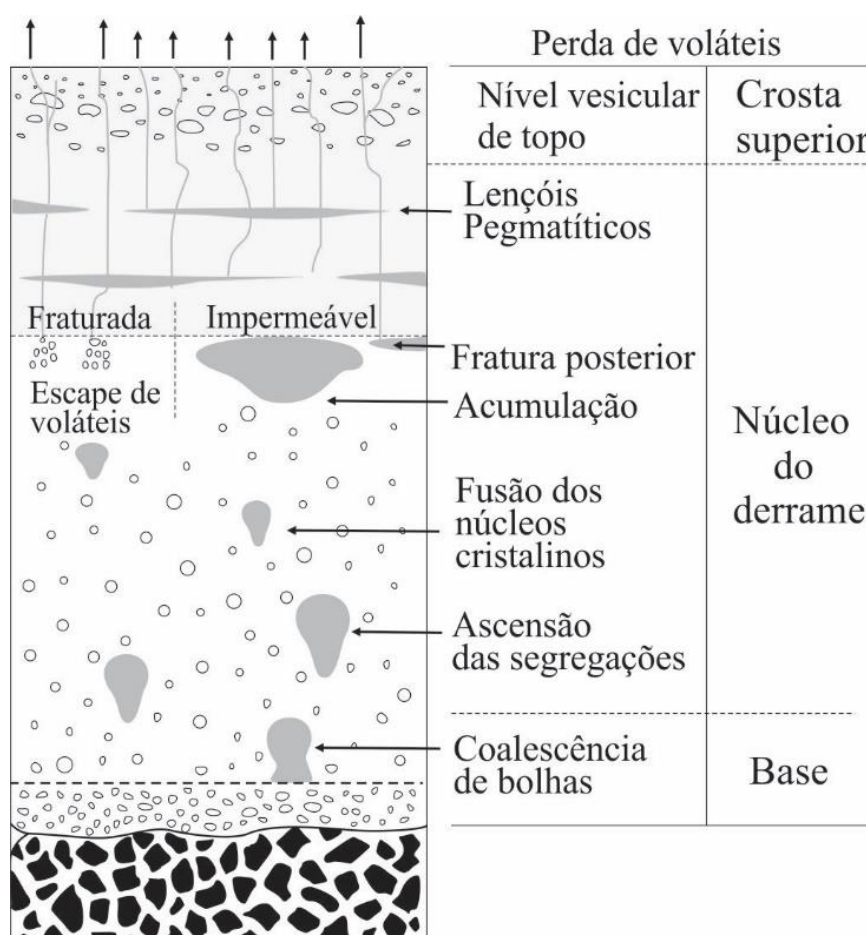


Figura 14 - Esquema ilustrando as fases de formação dos pegmatitos. Adaptado de Puffer & Horter (1993).

No derrame de North Mountain de Nova Scotia, no Canadá, Greenough & Dostal (1992) descrevem um derrame bandado devido à presença dos pegmatitos que, segundo os autores, foram formados por segregações ricas em líquidos drenadas para juntas horizontais formadas por resfriamento e contração. Dessa forma seriam explicados os contatos abruptos dos pegmatitos e encaixantes. Os autores basearam-se nos trabalhos de Helz *et al.* (1989) e Marsh (1990) feitos nos lagos de lava do Havaí. Puffer & Volkert (2001) contestam o trabalho de Greenough & Dostal (1992), pois as rochas vizinhas aos pegmatitos deveriam ser depletadas uma vez que os líquidos teriam migrado delas para a formação dos pegmatitos e, assim, restringem essa hipótese apenas a pegmatitos de espessura >10cm.



Segundo Philpotts *et al.* (1996), pesquisando nas unidades vulcânicas da Bacia de Hartford (EUA), a ocorrência dos pegmatitos é possível devido à formação de uma rede cristalina interconectada, com um terço do magma cristalizado (razão que depende da composição do magma), que é compactada gravitacionalmente, principalmente em derrames espessos. Assim, o líquido presente nos interstícios migraria ascendentemente e se dilataria. Caso o derrame seja espesso o bastante, a pressão de poros devido à migração do líquido residual pode romper a rede cristalina na porção de dilatação e formar um horizonte. Como o processo de migração ocorre em meio poroso devido ao derrame parcialmente cristalizado, é necessário que o líquido esteja essencialmente livre de núcleos de cristais para migração e para que ocorra a cristalização de cristais grandes quando se acumularem no interior do derrame. Como a camada sobreposta de basalto é mais densa, pode haver desestabilização, colapso e ascensão do líquido, gerando pequenas camadas pegmatíticas em cima do lençol pegmatítico.

Segundo Goff (1996), ao estudar diversas ocorrências nos EUA, a formação dos pegmatitos básicos ocorre quando há instabilidades de densidade no basalto hospedeiro devido a zonas de coalescência de bolhas (Figura 15). Quando as bolhas começam a ascender, forma-se uma zona de menor pressão vertical, na qual o líquido residual e vapor do derrame migram pelo processo filtro-prensa, descrito por Anderson *et al.* (1984), devido à presença de uma rede de cristais permeável em resposta ao gradiente de pressão.

Hartley & Thordarson (2009) discordam em parte do modelo proposto por Goff (1996), pois as rochas hospedeiras adjacentes a esses cilindros de vesículas deveriam ser depletadas em elementos incompatíveis devido a migração do material fundido residual e dos voláteis, diferente do que foi encontrado pelos autores nos basaltos de Columbia River, onde encontraram teores semelhantes para a encaixante e o pegmatito. Além disso, não foram encontradas diferenças texturais nas rochas, que seriam resultados do processo de extração do material fundido intercristalino da proposta de Goff (1996).

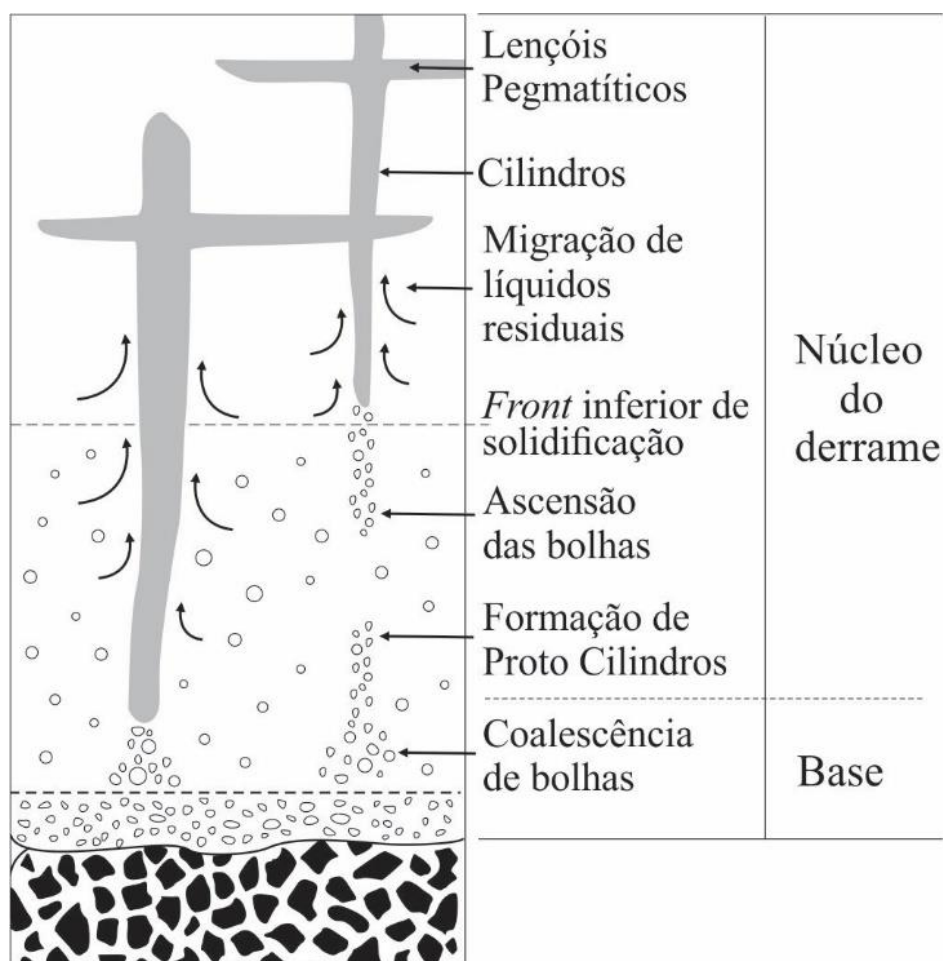


Figura 15 - Esquema ilustrando o processo de migração para a formação dos pegmatitos básicos. Adaptado de Goff (1996).

Hartley & Thordarson (2009) explicam a formação dos pegmatitos básicos pelo processo de cristalização fracionada de um horizonte de material fundido pertencente à porção basal do derrame, extração de um resíduo de voláteis intercrystalino e à ascensão desse material segregado, sendo a proveniência das segregações comprovada pela similaridade composicional destas e do vidro intersticial da base do derrame. Os cilindros de vesículas ascendem verticalmente da porção basal até a porção intermediária do derrame, chegando à interface com a porção superior identificada pelo aumento do número de vesículas e solidez. Ao se deparar com este anteparo, cessa-se a ascensão e transformam-se em horizontes pegmatíticos (Figura 16).

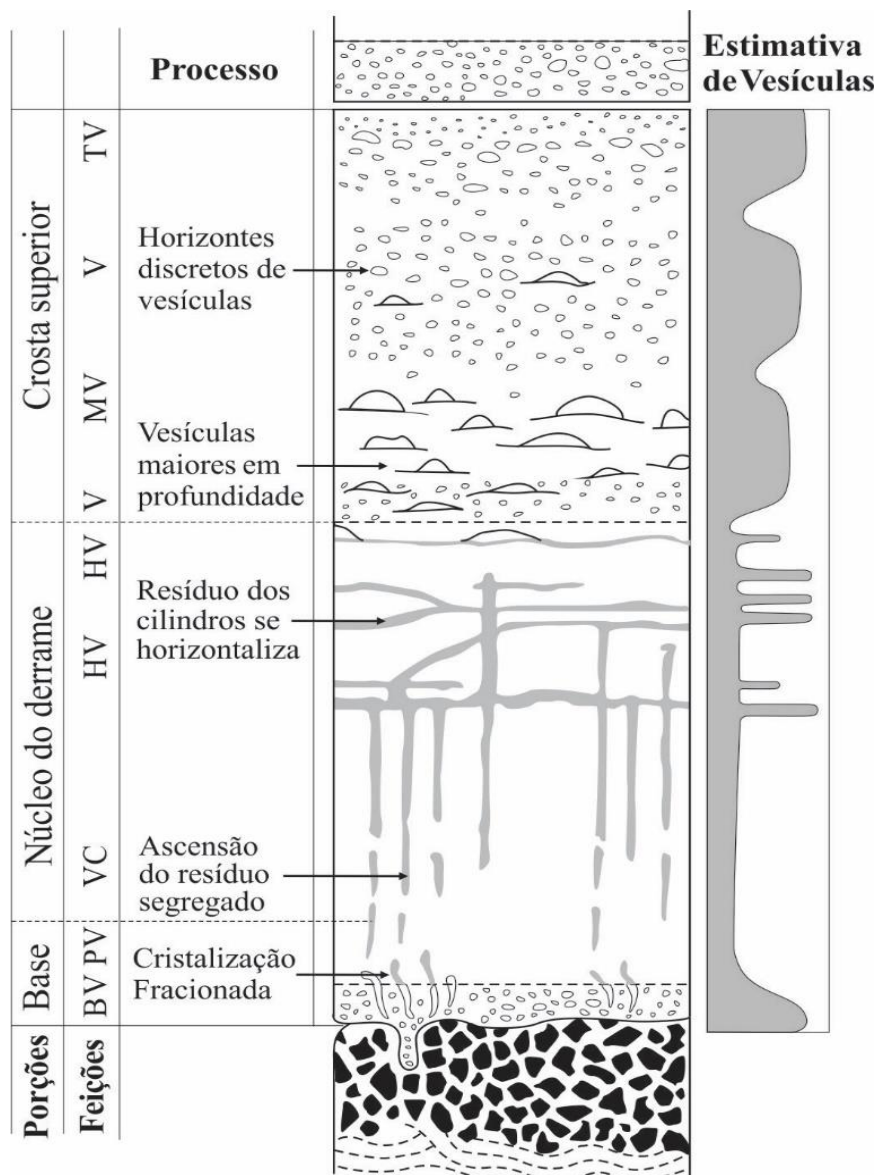


Figura 16 - Coluna indicando as porções e feições de um derrame, os processos envolvidos e a estimativa gráfica da quantidade de vesículas. No lado esquerdo há indicadores dos níveis do derrame e informações sobre as feições, que compreendem o padrão das vesículas, sendo: V= zona vesicular, onde “B” indica base e “T” indica topo. HV= lençol horizontal vesicular; MV= megavesículas; PV = cilindros de vesículas. Esquema adaptado de Hartley & Thordarson (2009). Estimativa de vesículas segundo Self *et al.* (1998).

De acordo com Goff (1996) e Hartley & Thordarson (2009), há uma relação entre a posição estratigráfica e a evolução dos pegmatitos, sendo que os primeiros líquidos segregados vão ascender

de forma mais rápida, pois o derrame estará menos resfriado, o que permitirá o avanço até níveis superiores. Os líquidos seguintes enfrentarão uma resistência maior ao ascenderem, fazendo com que residam por um tempo maior na porção média do derrame e ocuparão porções estratigráficas inferiores.

Goff (1996) relacionou os pegmatitos básicos a magmas ricos em água, porém controversamente nota-se que também ocorrem em magmas anidros. Dunham (1933) sugere que a concentração de flúor e do pentóxido de fósforo da fluorapatita e concentrações anômalas de água nas segregações derivadas de rochas anidras, provadas por minerais hidratados como zeólitas, poderiam contribuir para que resíduos líquidos não se solidificassem junto ao basalto, segregando-se.

Caroff *et al.* (2000) definem que pode haver incorporação de água meteórica antes da erupção, porém é pouco provável que ocorra na ascensão magmática, pois é um processo muito rápido comparado à difusão de água no magma.

Goff (1996) constatou que sedimentos encharcados não parecem ter uma relação com a formação dos pegmatitos estudados e a água seria característica do magma formador antes da erupção. Porém, no Preakness Basalt (New Jersey, EUA), Puffer & Volkert (2001) estudaram ocorrências de pegmatitos básicos em rochas anidras, como as da PMP, e sugerem que os pegmatitos básicos não foram formados por processos hidrotermais. Porém, fluidos teriam contribuído para a composição dos pegmatitos básicos, que podiam estar ainda em formação quando os líquidos hidrotermais os atingiram. A proveniência desses líquidos é provavelmente de rochas sedimentares subjacentes que envolviam a circulação de água salgada.

## **GEOLOGIA LOCAL**

No sudoeste do Paraná são descritas por Vasconcellos *et al.* (2001) ocorrências de camadas de granulação grossa, diferenciadas, encaixadas nos basaltos inflados da PMP e definidas, principalmente pela textura pegmatítica contrastante com a rocha encaixante, como gabros. Essas

rochas, estudadas posteriormente por Arioli (2008), Ferreira (2011) e Silva (2011), são classificadas como pegmatitos básicos.

Os afloramentos selecionados para este trabalho localizam-se nos municípios de Barracão e Capanema, no Paraná (Figura 17), onde os pegmatitos configuram corpos normalmente anastomosados e sub-horizontais.

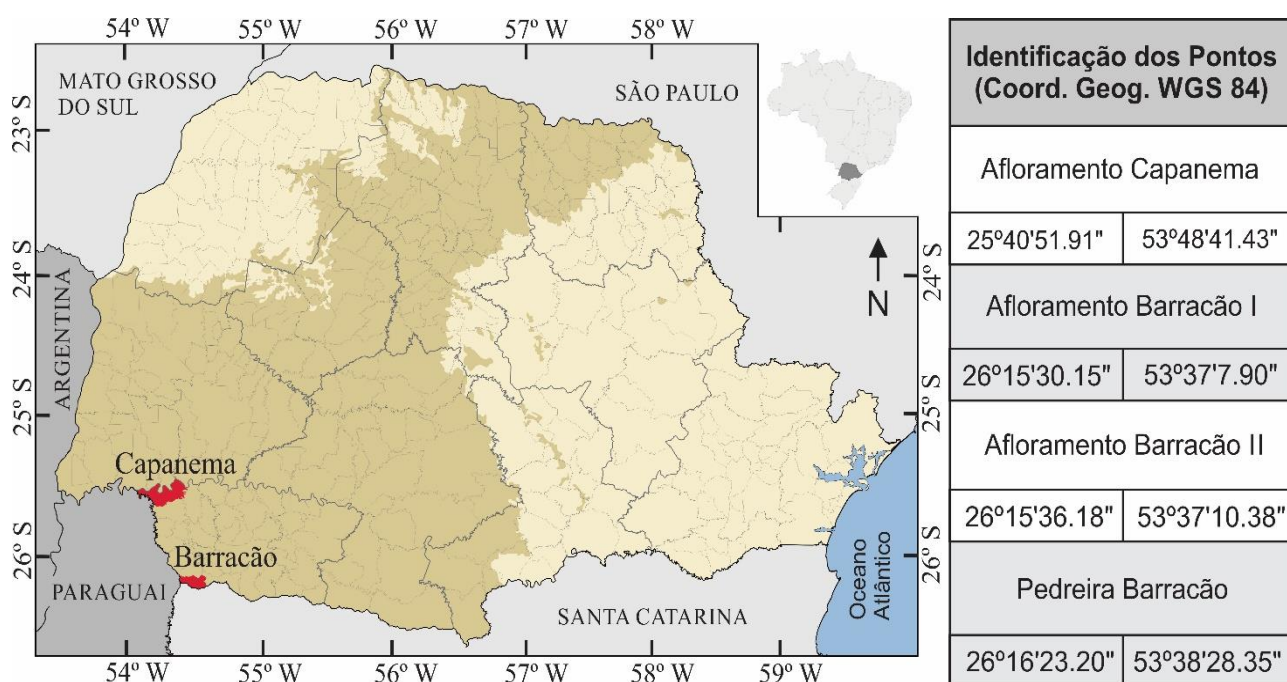


Figura 17 - Localização dos municípios de Barracão e Capanema (PR), destacados em vermelho, e tabela com coordenadas geográficas (WGS 84) dos pontos estudados. A área demarcada com cor mais escura representa a extensão da PMP no Paraná.

O afloramento de Barracão I possui cerca de 3 m de altura e 30 metros de largura (Figura 18a) e observa-se que topograficamente as rochas ocorrem em forma de lobos com quebras decorrentes do resfriamento e contração (Figura 18b) indicando atuação do processo de inflação, apesar de não se observar uma seção contínua de derrame com a arquitetura característica. Neste afloramento observa-se uma ocorrência onde um cilindro vertical que culmina na formação de lençóis pegmatíticos ao atingir a região superior já resfriada. O cilindro vertical (cil) com largura de 90 cm, bifurca-se dividindo-se em dois cilindros, cil-1 e cil-2. Destes cilindros, ramificam-se inúmeros

pegmatitos básicos, alguns deles representados na imagem por peg-1 (12 cm), peg-2 (16 cm) e peg-3 (40 cm) (Figura 18c). Essas ramificações, em algumas porções do afloramento, adelgaçam-se como vênulas e cortam-se, formando feições semelhantes a *stockworks* (Figura 18d). É comum ainda o preenchimento de juntas por carbonatos e clorita, além de bandamento incipiente gerado por porções mais abundantes com percolação de hidróxidos.

Nos afloramentos de Barracão II e Pedreira Barracão não ocorrem pegmatitos básicos, porém a rocha encaixante assemelha-se à de Barracão I e foi estudada com o intuito de comparação. O afloramento de Barracão II tem cerca de 3 m de altura, por 25 m de comprimento. É comum a presença de juntas com preenchimento de carbonato e clorita. Ocorrem juntas arqueadas, vesículas e amígdalas com carbonato.

O afloramento Pedreira Barracão apresenta um conjunto de bancadas de aproximadamente 8 metros. O basalto tem duas direções preferenciais de fraturas, formando prismas com faces em ângulo de cerca de 60° a quase ortogonais, preenchidas por cobre nativo dendrítico e carbonato. Em algumas porções do afloramento observa-se um bandamento incipiente com intercalação de níveis cinzas e avermelhados na rocha, provavelmente gerados por porções mais oxidadas.

O afloramento do município de Capanema, uma antiga pedreira da Prefeitura da referida cidade, chega a 15 m de altura, com um pátio central que se tornou um espaço de acúmulo de dejetos e encontra-se inundado, impossibilitando a observação das paredes que contêm os pegmatitos básicos. Os pegmatitos básicos ocorrem desde centimétricos a quase métricos, com 0,8 m (Figura 18e). O basalto encaixante possui fraturas preenchidas por carbonato e amígdalas de celadonita, carbonato ou vidro. Não são observados cilindros verticais pegmatíticos.





Figura 18 - (A) Afloramento de basalto em Barracão, contendo pegmatitos básicos concentrados na área demarcada; (B) Formação de lobos, provavelmente relacionados ao processo de inflação, associados a quebras, indicadas pela flecha, formadas pela contração devido ao resfriamento; (C) Destaque ao Cilindro vertical (cil-1 e cil-2) e ramificações horizontais (peg-1, peg-2 e peg-3). Contatos entre o pegmatito básico e o basalto destacados em amarelo. Município de Barracão; (D) Contatos semelhantes a *stockwork* entre o pegmatito básico (área tracejada) e o basalto. Município de Barracão (E) Contatos entre o pegmatito básico (área tracejada) e o basalto de Capanema;

## MATERIAIS E MÉTODOS

Foram selecionados 2 afloramentos principais e 2 afloramentos de suporte, nos quais foram coletadas 70 amostras, nos Municípios de Barracão e Capanema (PR) e confeccionadas 29 lâminas delgadas no LAMIN (Laboratório de Laminação). A análise dos óxidos ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  total,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) foi realizada pela técnica de fluorescência de raios X (FRX) no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR - UFPR) em 23 amostras por meio de pérola fundida em tetraborato de lítio. As rochas do município de Capanema foram analisadas, mesmo com a presença celadonita, devido à impossibilidade de separar esse mineral do restante da rocha. Após a confecção, a pérola foi analisada em equipamento de fluorescência de raios X da marca PANalytical, modelo Axios Max tubo Ródio 4 kV.

As análises de Elementos Terras Raras (ETR) (exceto Pm) e demais elementos traço (Ba, Cs, Cu, Hf, Nb, Ni, Rb, Sr, U, V, Y, Zn e Zr) para as 23 amostras foram realizadas em espectrômetro de massa com fonte de plasma do tipo ICP-MS pelo laboratório Bureau Veritas Minerals Laboratories.

## PETROGRAFIA

Os pegmatitos de Barracão são mesoscopicamente identificados pelas cores avermelhadas, devido à percolação de óxidos/hidróxidos de ferro, com cristais de tamanho médio de 0,2 cm, podendo atingir 0,5 cm (Figura 19a). Os pegmatitos de Capanema são mesoscopicamente identificados pelos cristais de augita dispostos em leque, com hastes encurvadas ou retas, com 0,5 a 1,0 cm em média e atingindo 6,0 cm. Percebe-se que os fenocristais de augita se ramificam das bordas em direção ao centro dos pegmatitos. Em campo, nota-se a presença de vidro e carbonato preenchendo amígdalas. As rochas têm cores variando de cinza a castanho, esverdeadas pela presença de celadonita (Figura 19b). O contato dos pegmatitos com as encaixantes, tanto em Capanema quanto em Barracão é abrupto.



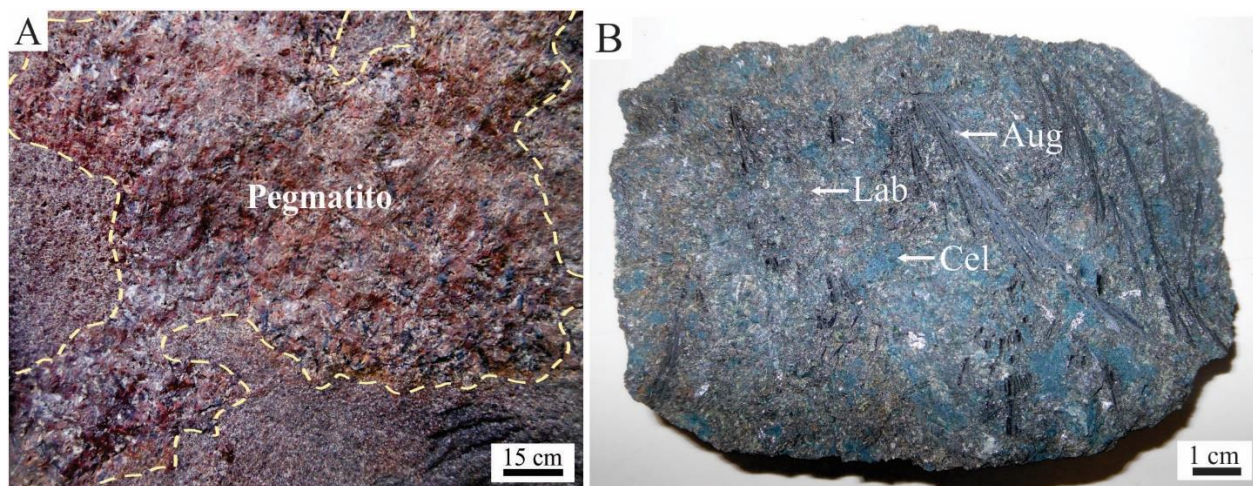


Figura 19 - (A) Contato de pegmatito básico e basalto em amostra de Barracão; (B) Amostra de pegmatito de Capanema, com leques de augita (Aug), prismas de labradorita (Lab), com a presença de celadonita (Cel);

## PEGMATITOS BÁSICOS

Microscopicamente, os pegmatitos são faneríticos porfiríticos com estrutura variolítica e texturas subofítica e, localmente, intergranular.

Os pegmatitos de Barracão têm granulação média em matriz fina a muito fina e é frequente a ocorrência de vesículas milimétricas. A granulação dos pegmatitos é cerca de cinco a dez vezes maior do que a do basalto encaixante.

Os pegmatitos de Capanema têm granulação média a grossa em matriz fina a muito fina. A granulação dos pegmatitos é dez a vinte vezes maior do que a do basalto encaixante. A celadonita ocorre disseminada na matriz e, em menor quantidade, como preenchimento de microcavidades.

Ao microscópio, a assembleia mineral é definida como composta por 40 a 60% de labradorita, 25 a 35% de augita e 10 a 15% de minerais opacos. Subordinadamente ocorrem argilominerais, hidróxidos de ferro, apatita e vidro vulcânico. Exclusivamente em Capanema, ocorre até 20% de celadonita em matriz e amígdalas.

A labradorita nos pegmatitos de Barracão ocorre como fenocristais com tamanho médio de 0,8 mm, chegando a 1,4 mm, e granulação média de 1 a 3 mm, podendo atingir até pouco mais de 5

mm, nos pegmatitos de Capanema (Figura 20a). Em ambas as ocorrências os cristais são subédricos a euédricos, ocasionalmente zonados, e parcialmente argilizados. Observa-se a feição de cauda de andorinha em cristais de plagioclásio (Figura 20b). Na geração matricial a labradorita tem granulação fina, com média de 0,1 a 0,2 mm nos pegmatitos de Barracão e de 0,2 mm em Capanema, predominantemente intersticiais aos fenocristais. Localmente o hábito radial dos cristais define texturas esferulíticas. Apresentam um nível avançado de argilização.

A augita ocorre como fenocristais e em matriz. Os fenocristais são ripiformes, dispostos em forma de leque, com ripas encurvadas ou retas, geralmente com opacos esqueléticos associados nas laterais com porções externas cloritizadas (Figura 20b), subédricos, com granulometria de 0,6 a 1,0 mm em Barracão e, em Capanema, com cristais de granulação média, de 3,5 a 5 mm, podendo ocorrer intercrescimento simplectítico com labradorita (Figura 20c). Na geração matricial, os cristais são menores do que 0,2 mm em ambos os afloramentos e são subédricos a anédricos, normalmente intersticiais.

Os agregados fibrorradiados de celadonita ocorrem apenas em Capanema, principalmente em meio à matriz da rocha (Figura 20d), mas também preenchendo cavidades arredondadas.

Opacos ocorrem principalmente associados aos cristais de augita, como fenocristais, com granulação média de aproximadamente 0,2 a 0,5 mm em Barracão e 0,3 a 0,8 mm em Capanema, tendo formas esqueléticas e formas de espinha de peixe, caracterizados como ilmenita e magnetita. Em matriz, com granulação fina, percebem-se cristais de opacos anédricos disseminados na matriz e aciculares preenchendo planos de fraqueza em outros cristais e formando filamentos.

Os argilominerais ocorrem como alteração na borda de fenocristais de augita e plagioclásio e também na matriz, tornando os demais cristais turvos. O hidróxido de ferro ocorre subordinadamente, percolando fraturas, decorrente da alteração dos opacos.

Subordinadamente, ocorre: vidro vulcânico na matriz, majoritariamente cloritizado, turvo e com aspecto maciço ou dendrítico; apatita acicular com granulação muito fina; e carbonato no preenchimento de cavidades.



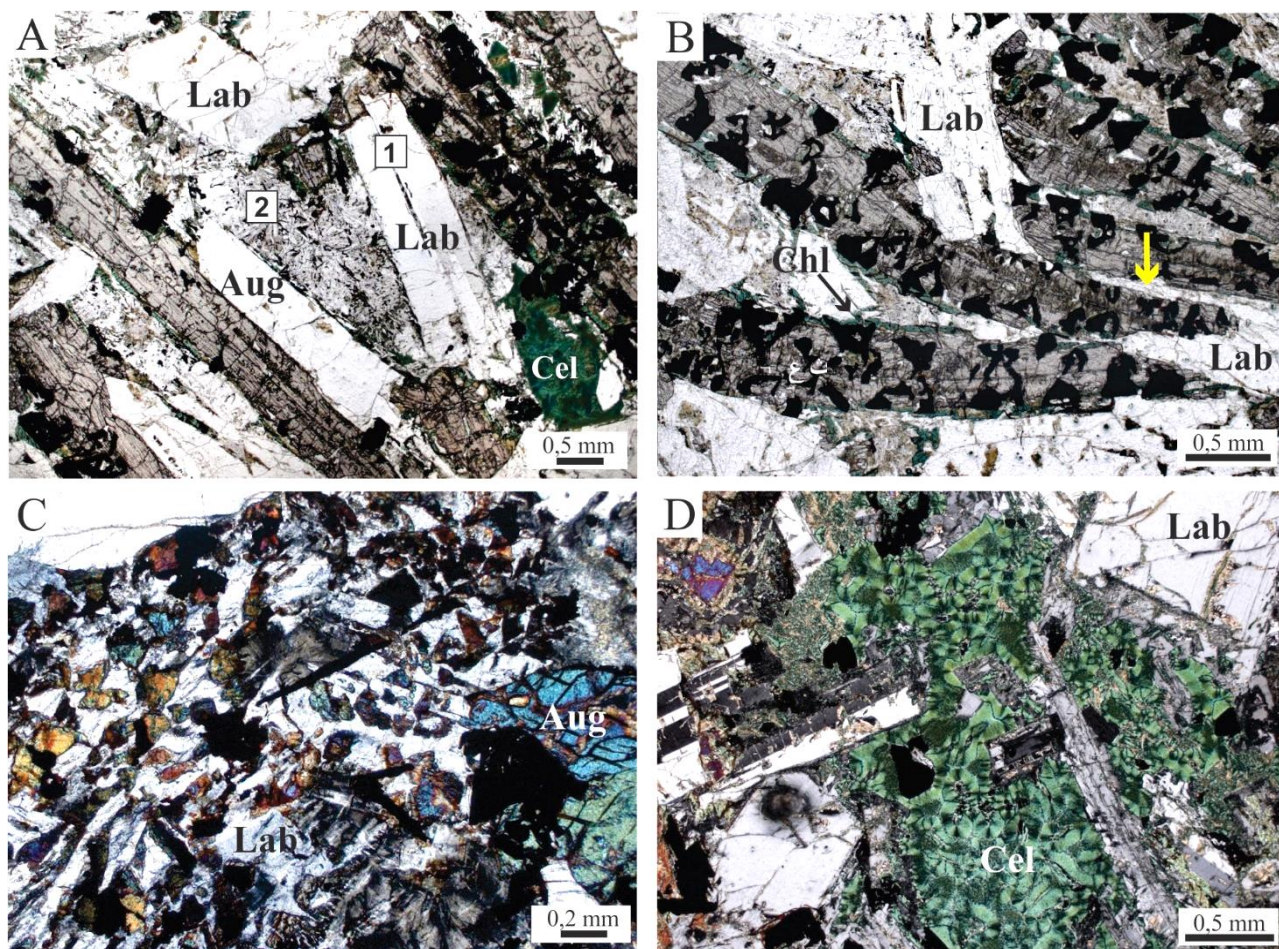


Figura 20 - Fotomicrografias (A) Gerações de cristalização de labradorita (Lab) no pegmatito básico, polarizadores paralelos (P//). Geração “1” representada por fenocristais de labradorita. Geração “2” representada por cristais de labradorita da matriz. Pegmatito Capanema; (B) Cristais ripiformes de augita (Aug), com opacos esqueletais. Nas bordas, há cristais de clorita (Chl). Labradorita com terminações em cauda de andorinha (flecha amarela). P//. Pegmatito de Capanema; (C) Intercrescimento simplectítico de augita e labradorita, polarizadores cruzados (PX). Pegmatito de Barracão; (D) Celadonita (Cel) em agregados fibrorradiados na matriz. PX. Pegmatito de Capanema.

## BASALTOS

Os basaltos são faneríticos porfiríticos, têm estrutura variolítica e textura predominantemente hipohialina, normalmente subofítica, localmente intergranular. São compostos por 45-60% de



labradorita, 30-40% de augita e 10-20% de minerais opacos. Em porcentagem subordinada ocorrem hidróxidos de ferro, argilominerais, clorita e vidro.

Os basaltos de Barracão são cinza avermelhados, com matriz de granulação fina, variando de 0,2 mm a 0,4 mm e fenocristais finos a médios, atingindo 1,2 mm, com granulação mais grossa do que os basaltos de Capanema (Figura 21a).

Os basaltos de Capanema possuem granulação mais fina e são cinza escuros a castanhos, por vezes levemente esverdeado, com granulação fina a muito fina, em média de 0,1 mm a 0,25 mm. Os fenocristais são finos a médios, podendo atingir 1,4 mm (Figura 21b).

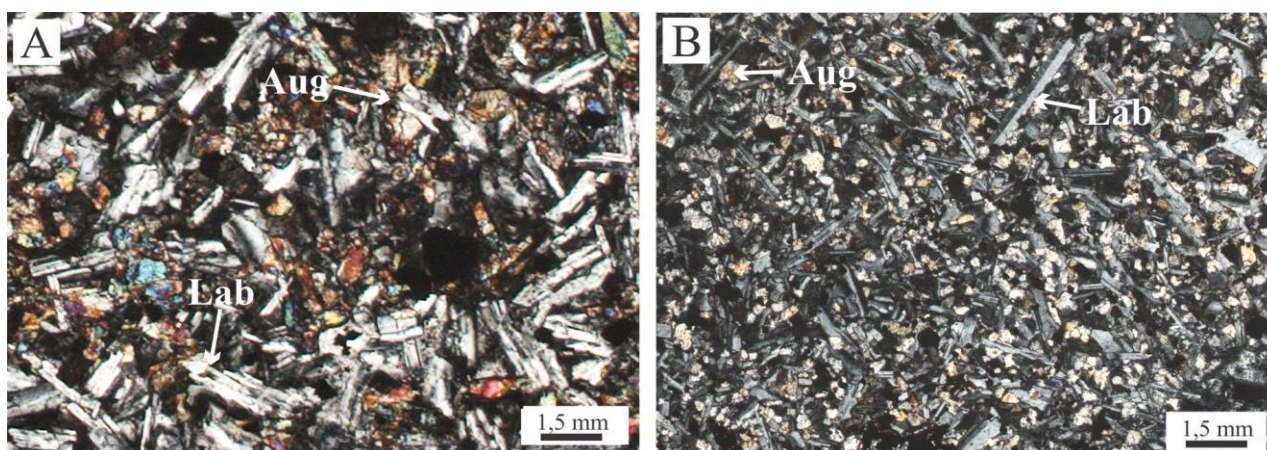


Figura 21 – Fotomicrografias dos basaltos em P// para comparação da granulação: (A) basalto de Barracão; (B) basalto de Capanema. Aug = augita; Lab = labradorita.

Os cristais de labradorita são ripiformes e ocorrem como fenocristais de granulação fina a média, em média com 0,8 mm, podendo atingir 1,2 mm, e em matriz com tamanho médio de 0,4 mm. Em Capanema, a primeira fase é de fenocristais de granulação fina a média, subédricos, com até 1,4 mm em seu eixo maior, não ultrapassando 0,8 mm. A segunda geração forma a matriz, com granulação fina a muito fina, com tamanhos inferiores a 0,2 mm no eixo maior.

Os cristais de augita, subédricos a anédricos, são compostos por fenocristais com 0,2 a 0,4 mm, arredondados, com fraturas preenchidas por hidróxido de ferro; na geração matricial os cristais são muito finos a finos, em média de 0,1 mm.

Os cristais de opacos ocorrem como microfenocristais com granulação fina e tamanhos aproximados de 0,1 a 0,3 mm, anédricos com bordas serrilhadas a subédricos, poiquilíticos em alguns casos e cristais de granulação muito fina, formando a matriz nas duas ocorrências estudadas.

## GEOQUÍMICA

Foram analisadas 23 amostras (13 de pegmatitos básicos e 10 de basaltos encaixantes). A Tabela 6 exibe os dados dos óxidos (% peso), não recalculados para base anidra, os valores de LOI (*Loss on Ignition*), os minerais normativos (%) calculados pela norma CIPW, os elementos traço e os ETR ( $\mu\text{g/g}$ ). Para o cálculo de FeO e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , a partir do  $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{total})}$  foram usadas as razões de Middlemost (1989).

Todas as rochas analisadas são supersaturadas em  $\text{SiO}_2$ , com quartzo normativo variando entre 1,45 e 8,62%. Os outros minerais normativos são: plagioclásio (32,82 a 44,62%), ortoclásio (6,09 a 18,56%), diopsídio (12,71 a 21,45%), hiperstênio (13,57 a 18,34%), ilmenita (4,16 a 7,27%), magnetita (4,03 a 8,19%) e apatita (0,58 a 0,97%).

As amostras coletadas pertencem ao domínio central da PMP de Bellieni *et al.* (1984) e de Mantovani *et al.* (1985), e os basaltos encaixantes são classificados como Tipo 1 (LSi, LZr, LTi e LP), segundo classificação de Licht & Lima (2014), que permite classificar cada um desses teores em altos (acrescidos pela letra H) e baixos (acrescidos pela letra L). Os basaltos de Capanema são do Tipo 1 Centro-Norte e os de Barracão do Tipo 1 Sul, separadas geograficamente. Os pegmatitos classificam-se como Tipo 1 Sul, Tipo 3 (LSi, LZr, HTi e LP, onde “H” significa alto) e Tipo 4 (LSi, LZr, HTi e HP). Na classificação de Peate (1989) e Peate *et al.* (1992), as rochas são do tipo Paranapanema.

Tabela 6 - Resultado das análises dos óxidos, elementos traço, ETR e cálculo dos minerais normativos para os pegmatitos (Peg) e basaltos (Bas) de Barracão (BA, BB e PR) e Capanema (CA).

	Amostra	BA-01	BA-07	BB-03	BB-05	PR-01	PR-02	BA-02	BA-03	BA-05	BA-06	BA-08	BA-13	BA-16
	Tipo	Bas	Bas	Bas	Bas	Bas	Bas	Peg	Peg	Peg	Peg	Peg	Peg	Peg
Óxidos (% peso)	SiO <sub>2</sub>	51,32	51,05	50,94	51,17	51,51	51,54	50,43	50,54	50,39	51,71	49,77	50,96	50,37
	TiO <sub>2</sub>	2,49	2,46	2,16	2,20	2,39	2,40	2,86	3,08	3,08	2,72	3,18	3,40	3,44
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,65	12,60	13,38	12,98	12,72	12,64	12,09	11,86	11,74	12,32	11,66	11,10	11,29
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,13	15,99	15,05	15,29	15,89	15,83	17,25	17,65	17,67	16,49	18,17	18,65	18,62
	MnO	0,21	0,21	0,21	0,20	0,21	0,21	0,23	0,20	0,21	0,19	0,22	0,19	0,19
	MgO	4,66	4,66	5,03	5,01	4,74	4,51	4,19	3,49	3,79	3,84	4,03	3,12	3,35
	CaO	8,57	8,56	9,00	9,00	8,87	8,74	8,25	7,63	7,69	7,70	7,99	7,12	7,39
	Na <sub>2</sub> O	2,42	2,41	2,51	2,45	2,55	2,60	2,47	2,52	2,47	2,60	2,45	2,43	2,44
	K <sub>2</sub> O	1,26	1,24	1,12	1,11	1,14	1,26	1,32	1,49	1,51	1,47	1,38	1,61	1,54
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,30	0,29	0,25	0,26	0,28	0,28	0,32	0,38	0,37	0,37	0,34	0,41	0,39
	LOI	0,52	1,03	0,44	0,51	0,25	0,31	1,03	1,29	1,38	1,09	1,09	1,47	1,49
	Total	100,53	100,49	100,08	100,19	100,56	100,33	100,44	100,13	100,31	100,50	100,28	100,46	100,51
Minerais normativos (%)	qz	5,68	5,67	4,10	4,85	5,11	5,13	5,46	6,75	6,30	7,05	5,27	8,62	7,44
	pl	40,91	41,02	43,85	42,55	41,92	41,59	39,67	38,98	38,33	40,37	38,36	36,10	36,86
	or	7,56	7,45	6,74	6,68	6,80	7,56	7,98	9,04	9,16	8,86	8,33	9,75	9,34
	di	17,46	17,53	17,82	18,43	18,79	18,98	17,84	16,24	16,62	15,55	17,80	15,64	16,31
	hy	18,15	18,15	18,33	18,15	17,52	16,81	17,64	16,84	17,48	17,14	17,86	16,74	16,88
	il	4,79	4,77	4,16	4,24	4,58	4,62	5,55	6,00	6,00	5,26	6,17	6,63	6,70
	mt	4,74	4,73	4,44	4,51	4,65	4,65	5,10	5,25	5,25	4,87	5,39	5,55	5,54
	ap	0,70	0,70	0,58	0,60	0,65	0,65	0,76	0,90	0,88	0,88	0,81	0,97	0,93
Elementos traço (µg/g)	Ba	308,0	311,0	267,0	284,0	296,0	299,0	334,0	390,0	378,0	380,0	355,0	409,0	403,0
	Co	67,1	64,4	62,8	61,1	63,9	62,3	80,9	69,2	66,8	61,4	68,6	56,3	63,1
	Cs	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	0,1	0,5	0,3	0,4	<1,0	0,3	0,5	0,5
	Cu	167,6	174,1	333,6	192,4	203,7	168,7	219,5	207,0	215,0	227,9	236,4	201,5	203,6
	Hf	5,0	4,9	4,7	4,7	4,8	4,9	5,4	6,8	6,4	6,6	6,0	6,7	6,6
	Nb	14,7	14,7	12,9	12,9	14,3	14,7	16,2	18,2	19,3	18,3	17,3	20,8	20,3
	Ni	13,1	13,4	15,9	17,5	15,6	14,8	14,7	8,8	10,1	11,6	11,7	6,9	8,5
	Rb	26,5	26,0	23,6	22,7	28,5	28,5	31,3	35,2	35,4	28,7	33,2	41,7	37,0
	Sr	230,8	231,6	250,6	239,5	258,8	240,9	232,8	222,5	227,8	237,8	230,9	227,6	227,3
	U	0,4	0,2	0,1	0,1	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,4
	V	457,0	438,0	418,0	429,0	460,0	433,0	573,0	427,0	485,0	347,0	564,0	306,0	412,0
	Y	34,6	35,6	32,6	33,7	36,6	35,3	80,2	195,9	92,1	42,6	137,1	109,4	163,7
	Zn	46,0	49,0	58,0	49,0	47,0	50,0	68,0	77,0	73,0	47,0	81,0	79,0	79,0
	Zr	191,5	190,9	167,0	166,8	190,9	185,7	206,2	244,1	239,0	233,5	217,5	267,9	252,5
ETR (µg/g)	La	21,5	21,3	18,5	19,0	22,3	20,4	27,5	33,4	32,2	27,7	31,5	36,4	34,4
	Ce	49,1	49,1	41,9	43,3	48,2	48,3	52,7	60,3	59,0	61,1	57,3	68,2	64,8
	Pr	6,2	6,1	5,5	5,5	6,1	6,1	7,8	9,2	8,9	7,3	8,6	9,5	9,7
	Nd	27,9	26,5	23,1	23,2	27,0	25,7	35,9	46,6	40,8	30,9	41,5	41,7	44,9
	Sm	6,3	6,0	5,5	5,5	5,8	6,0	8,9	10,9	10,4	6,7	10,2	9,6	11,2
	Eu	1,9	1,8	1,7	1,8	1,9	1,8	2,9	3,5	3,4	2,2	3,4	3,0	3,7
	Gd	7,0	6,9	6,2	6,2	7,0	7,1	13,5	21,1	16,1	8,1	18,7	14,1	20,6
	Tb	1,1	1,1	1,0	1,0	1,1	1,1	2,0	2,7	2,3	1,3	2,5	2,1	2,7
	Dy	6,9	6,8	6,2	6,7	7,0	6,9	13,2	17,4	15,5	7,7	16,5	13,0	17,4
	Ho	1,4	1,4	1,2	1,3	1,4	1,4	2,7	4,1	3,3	1,5	3,7	3,1	4,1
	Er	4,0	3,8	3,7	3,6	3,7	3,9	8,2	11,2	9,3	4,3	10,8	9,3	11,5
	Tm	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6	1,2	1,3	1,3	0,6	1,5	1,3	1,4
	Yb	3,9	3,6	3,3	3,3	3,6	3,6	7,5	6,9	8,2	4,0	8,2	7,2	7,1
	Lu	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6	1,2	1,1	1,3	0,6	1,4	1,2	1,2

Tabela 6 – Continuação.

	Amostra	CA-03	CA-04	CA-30	CA-31	CA-06	CA-19	CA-21	CA-23	CA-24	CA-27
	Tipo	Bas	Bas	Bas	Bas	Peg	Peg	Peg	Peg	Peg	Peg
Óxidos (% peso)	SiO <sub>2</sub>	50,50	50,89	49,98	49,92	49,03	50,14	49,20	49,89	50,67	50,23
	TiO <sub>2</sub>	2,21	2,19	2,24	2,15	3,74	3,65	3,71	3,62	3,37	3,45
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,51	13,46	13,53	13,46	11,43	11,71	11,80	11,64	12,07	11,94
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,71	14,01	14,33	14,35	18,39	17,99	18,00	17,82	17,18	17,42
	MnO	0,19	0,20	0,22	0,20	0,24	0,20	0,21	0,23	0,17	0,22
	MgO	5,64	5,67	5,78	5,65	4,08	3,85	4,01	3,85	3,77	3,89
	CaO	9,82	9,92	9,98	9,71	6,36	6,16	6,12	5,92	6,12	6,33
	Na <sub>2</sub> O	2,50	2,65	2,45	2,48	2,41	2,61	2,58	2,53	2,72	2,57
	K <sub>2</sub> O	1,23	1,02	1,01	1,25	2,95	2,78	2,82	3,07	2,73	2,98
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,26	0,25	0,25	0,26	0,37	0,38	0,37	0,41	0,41	0,37
	LOI	-0,16	-0,08	0,71	0,29	0,88	0,63	1,44	1,38	1,09	1,13
	Total	99,57	100,26	100,45	99,72	99,88	100,10	100,26	100,37	100,31	100,52
Minerais normativos (%)	qz	2,23	2,25	1,96	1,45	3,90	3,08	4,02	4,73	5,42	4,43
	pl	43,84	44,62	44,28	43,64	32,82	34,79	34,97	33,51	36,42	34,61
	or	7,39	6,09	6,03	7,51	17,85	16,78	17,08	18,56	16,49	17,97
	di	20,95	21,45	20,86	20,65	14,84	13,72	13,26	13,05	12,71	14,17
	hy	16,69	16,71	17,76	17,75	14,27	18,34	14,55	14,22	13,83	13,57
	il	4,25	4,20	4,31	4,16	7,27	7,07	7,22	7,03	6,53	6,67
	mt	4,03	4,10	4,22	4,23	8,19	5,32	8,03	7,93	7,63	7,71
	ap	0,60	0,58	0,58	0,60	0,88	0,90	0,88	0,97	0,97	0,88
Elementos traço (µg/g)	Ba	319,0	313,0	312,0	335,0	401,0	429,0	429,0	445,0	484,0	440,0
	Co	77,2	77,9	65,0	68,9	65,0	62,5	56,8	57,0	62,5	58,0
	Cs	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	0,6	0,3	0,4	0,3	0,2	0,5
	Cu	261,2	228,9	239,6	261,0	280,6	290,4	281,2	258,6	289,2	287,8
	Hf	3,9	3,9	3,9	3,8	5,7	5,8	5,9	6,2	6,3	5,9
	Nb	12,7	12,1	12,7	12,5	20,3	20,7	21,3	21,7	21,4	19,0
	Ni	30,4	28,6	28,6	27,0	12,5	10,2	10,1	8,1	10,2	11,5
	Rb	28,7	20,1	18,4	31,8	117,6	102,4	101,0	112,8	95,1	110,7
	Sr	379,9	381,1	385,0	383,5	350,8	362,0	371,0	357,8	379,7	358,1
	U	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3
	V	443,0	430,0	439,0	432,0	609,0	542,0	545,0	521,0	480,0	562,0
	Y	24,8	25,9	24,8	25,5	31,4	32,8	35,6	35,7	34,2	31,3
	Zn	61,0	65,0	60,0	60,0	116,0	115,0	157,0	150,0	92,0	109,0
	Zr	153,2	145,0	147,0	145,2	214,2	226,8	218,5	236,0	240,1	212,8
ETR (µg/g)	La	20,4	18,7	19,8	20,5	27,9	29,4	28,6	30,5	30,3	28,7
	Ce	44,9	43,3	43,3	44,2	61,7	64,7	63,0	68,5	67,2	63,6
	Pr	5,5	5,4	5,4	5,4	7,7	7,9	7,8	8,5	8,2	7,5
	Nd	22,4	24,0	22,7	22,9	33,0	33,5	32,7	35,1	34,6	33,8
	Sm	4,9	4,9	5,0	5,0	6,7	7,0	6,7	7,3	7,3	7,0
	Eu	1,7	1,6	1,6	1,6	2,3	2,3	2,2	2,4	2,4	2,2
	Gd	5,2	5,6	5,3	5,2	7,2	7,5	7,2	7,5	7,7	7,0
	Tb	0,8	0,8	0,8	0,8	1,1	1,1	1,1	1,2	1,1	1,0
	Dy	4,8	4,8	4,9	4,9	6,3	6,5	6,7	7,3	6,7	6,3
	Ho	0,9	0,9	1,0	1,0	1,3	1,3	1,4	1,4	1,3	1,3
	Er	2,6	2,7	2,8	2,6	3,5	3,7	3,8	4,2	3,7	3,5
	Tm	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5
	Yb	2,5	2,4	2,3	2,5	3,3	3,6	3,5	3,5	3,6	3,3
	Lu	0,4	0,4	0,3	0,4	0,5	0,6	0,5	0,6	0,5	0,5

No diagrama  $R_1R_2$  ( $R_1=4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)$  x  $R_2=6Ca+2Mg+Al$ ) de De La Roche *et al.* (1980) (Figura 22) as rochas dividem-se em quatro campos: as rochas encaixantes de Capanema concentram-se no campo dos basaltos, já as rochas hospedeiras de Barracão concentraram-se no campo dos andesi-basaltos. Os pegmatitos de Capanema situam-se no campo dos latitos e os pegmatitos de Barracão dividem-se entre os campos do latiandesito e andesi-basalto.

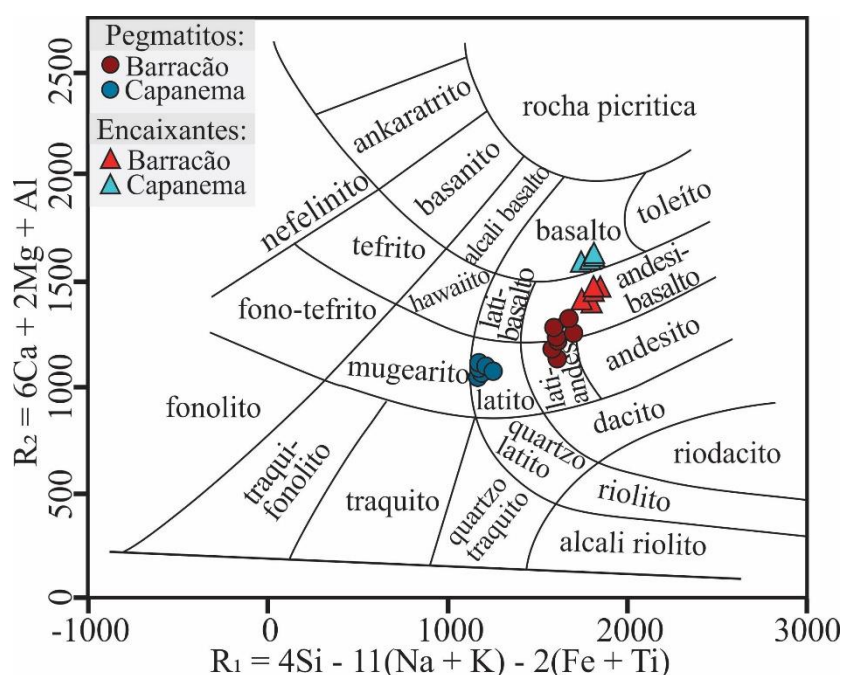


Figura 22 - Diagrama milicatônico  $R_1R_2$  ( $R_1=4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)$  x  $R_2=6Ca+2Mg+Al$ ) de De La Roche *et al.* (1980).

A interpretação dos dados em diagramas de variação do tipo Fenner, utilizando o MgO como óxido discriminante (Figura 23) define enriquecimento em  $TiO_2$ ,  $K_2O$ ,  $P_2O_5$  e  $Fe_2O_{3total}$ , um leve enriquecimento em  $Na_2O$ , empobrecimento em MgO, CaO e  $Al_2O_3$  e valores de  $SiO_2$  semelhantes nos pegmatitos, com relação aos basaltos.

O empobrecimento em MgO,  $Al_2O_3$  e CaO é relacionado ao fracionamento de augita e labradorita na encaixante e no pegmatito. O FeO está incorporado na augita e, junto com o  $TiO_2$ , em minerais opacos (magnetita e ilmenita), abundantes nos pegmatitos. Em Capanema, há mais  $Fe_2O_3$ , indicando



maior incorporação na ilmenita e magnetita. Nos pegmatitos de Capanema, observa-se um aumento anômalo de  $K_2O$ , explicado pela presença de celadonita.

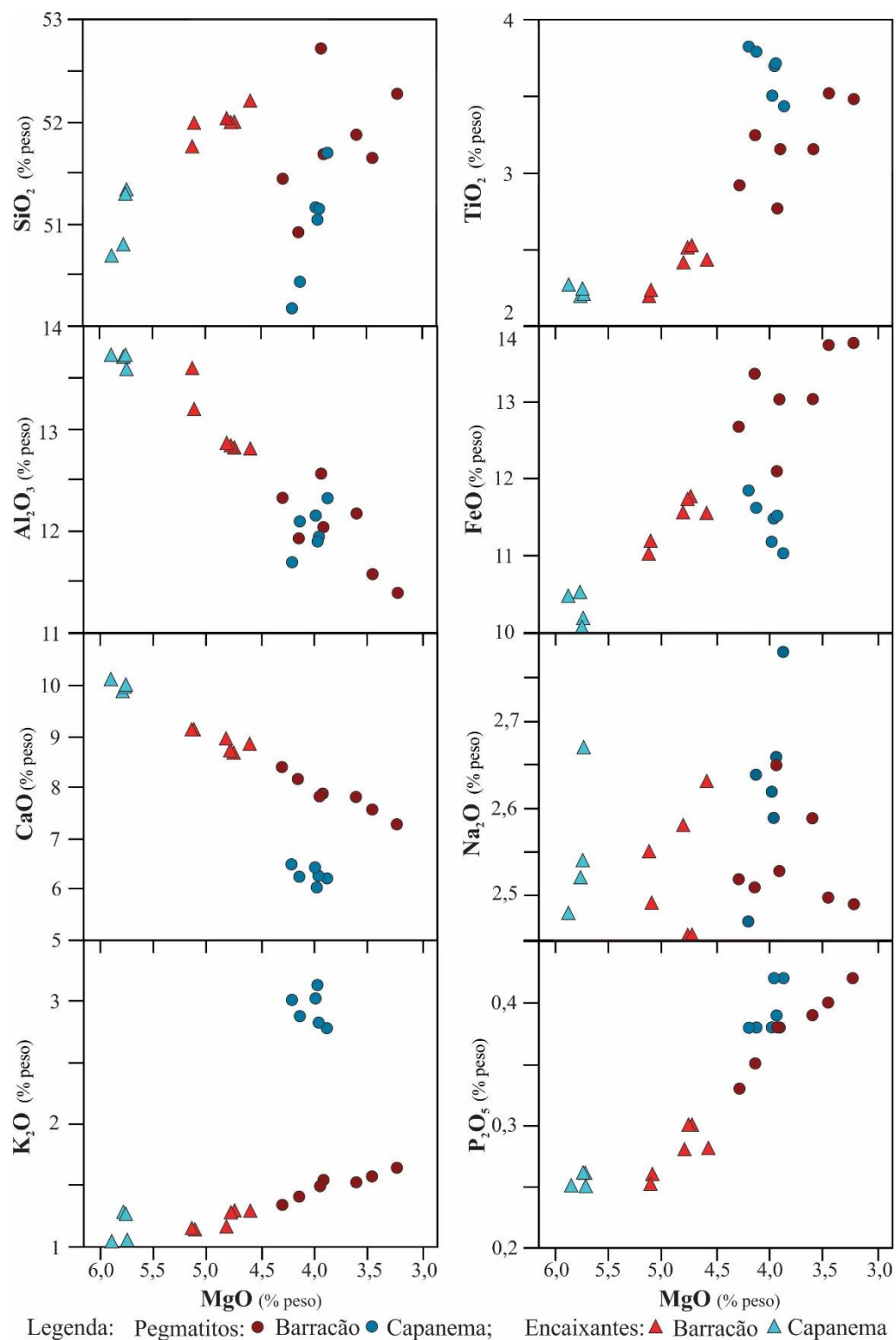


Figura 23 - Diagramas de variação do tipo Fenner, para óxidos maiores utilizando MgO como óxido discriminante, para as rochas de Barracão e Capanema.

Os teores de  $\text{Na}_2\text{O}$  estão relacionados ao plagioclásio ligeiramente mais sódico nos pegmatitos. Os teores de  $\text{P}_2\text{O}_5$  estão associados à ocorrência de apatita. As rochas de Capanema têm comportamento mais variado entre encaixante e pegmatito, com um agrupamento de pontos bem definido. Nas de Barracão, há uma gradação desde os basaltos mais primitivos até os pegmatitos mais evoluídos de forma quase linear. Assim, sugere-se que, em termos geoquímicos, as segregações de Capanema são mais diferenciadas das suas encaixantes do que as de Barracão.

Os diagramas multielementares para elementos traço foram normalizados pelo manto primordial de Wood *et al.* (1979) para as rochas de Capanema e Barracão (Figura 24). Ambos pegmatitos são enriquecidos nos elementos traço, à exceção do Sr.

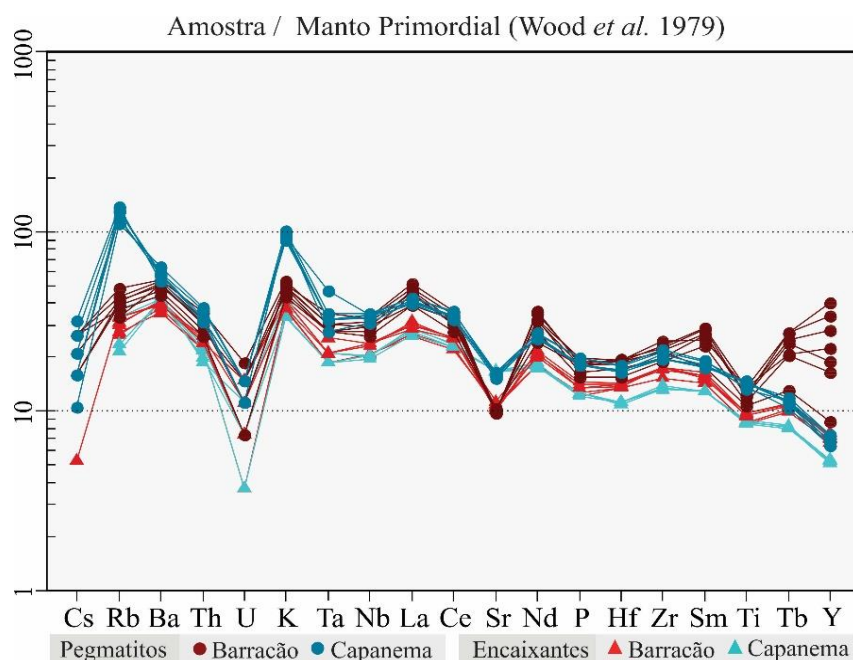


Figura 24 - Comparação entre as encaixantes e os pegmatitos básicos de Barracão e Capanema em diagrama mutielementar para elementos traço normalizados pelo manto primordial de Wood *et al.* (1979).

Os pegmatitos de Barracão têm, em geral, valores que se diferenciam gradativamente das rochas encaixantes, enquanto os pegmatitos de Capanema têm assinaturas distintas quando se comparam pegmatitos e basaltos. Esse comportamento também é observado nos óxidos e é relacionado a um grau de fracionamento maior durante a formação destas rochas.

Nota-se que os pegmatitos de Capanema distinguem-se por serem levemente mais enriquecidos em LILE (*large ion lithophile elements*) e notavelmente enriquecidos em Rb e K em comparação aos pegmatitos de Barracão. Os pegmatitos de Barracão distinguem-se por serem enriquecidos em ETRP, padrão também verificado nas rochas encaixantes e, notavelmente, enriquecidos em Y tanto em comparação com as encaixantes quanto com os pegmatitos de Capanema.

O Sr divide claramente as rochas de Barracão e Capanema, considerando a sua concentração entre os pegmatitos básicos e as encaixantes. Os valores em Barracão variam entre 222,5 a 258,8  $\mu\text{g/g}$  e em Capanema entre 350,8 a 385,0  $\mu\text{g/g}$ .

As anomalias positivas de Y são 2 a 5 vezes maiores nos pegmatitos do que nas encaixantes de Barracão e podem indicar uma fonte que não fracionou granada e que não reteve o elemento, que ficou concentrado nas fases finais de cristalização, provavelmente em apatita e augita.

A intensa anomalia positiva de K e Rb nos pegmatitos de Capanema é devida à presença de celadonita nestes litotipos.

O Ni possui valores altos exclusivamente para os basaltos encaixantes de Capanema, que parecem refletir um comportamento mais primitivo, corroborado pela abundância de MgO nessas rochas, sugerindo que não tenha sido fracionado em olivinas de rochas pretéritas. O Ni provavelmente deve estar associado à magnetita e à augita nas encaixantes de Capanema.

No diagrama multielementar normalizado pelo condrito de McDonough & Sun (1995) para os ETR (Figura 25), observa-se que a assinatura geoquímica das rochas é de enriquecimento em ETR comparado ao condrito. As rochas de Capanema têm um padrão mais constante na distribuição dos ETR comparado com as encaixantes, e têm valores dos ETRL (principalmente La, Ce e Pr) semelhantes aos de Barracão. A partir do Eu, com o início dos ETRP, os teores do Gd ao Lu de Barracão são distintivamente mais elevados nos pegmatitos com relação aos basaltos. A partir do Gd, a assinatura dos basaltos de Barracão assemelha-se à dos pegmatitos de Capanema e os teores dos pegmatitos de Barracão exibem valores de cerca de 2 a 4 vezes maiores do que os pegmatitos de Capanema. As rochas de Barracão têm razão  $(\text{La/Lu})_N$  variando entre 1,9 a 2,6, com uma amostra

apenas com razão de 3,7, nos pegmatitos e de 3,1 a 3,3 nos basaltos, mostrando enriquecimento em ETRP. Os pegmatitos de Capanema têm razão  $(La/Lu)_N$  de 4,5 a 4,7 e as encaixantes de 4,3 a 4,9.

Os altos valores de ETRP nos pegmatitos de Barracão devem estar concentrados na apatita, considerando-se o alto coeficiente de partição desses elementos nesse mineral segundo Rollinson (1993). Nota-se também que as rochas encaixantes das quais estes pegmatitos derivam têm uma abundância desses elementos, bem como na fonte, onde não deve ter ocorrido fracionamento de granada.

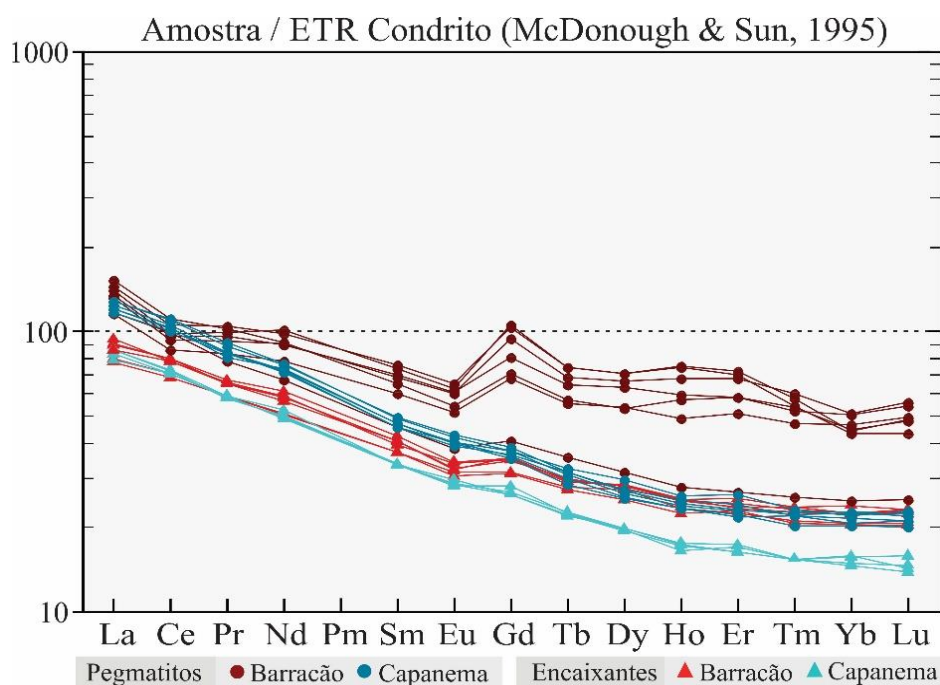


Figura 25 - Diagrama de ETR normalizados pelo condrito de McDonough & Sun (1995) para os pegmatitos básicos e rochas encaixantes de Barracão e Capanema.

## DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Nos municípios de Barracão e Capanema, no sudoeste do Paraná, ocorrem pegmatitos básicos nos derrames espessos gerados pelo processo de inflação, pertencentes à Província Magmática do Paraná.

Do ponto de vista petrográfico, nota-se que a assembleia mineral dos basaltos e dos pegmatitos estudados é muito semelhante, sendo a granulação mais grossa dos pegmatitos o principal critério para distingui-los das encaixantes. Há feições que indicam rápido resfriamento e corroboram com o processo de formação dos pegmatitos por cristalização rápida de líquidos segregados. São elas: cristais de labradorita com terminações em cauda de andorinha, agregados de labradorita compondo a matriz da rocha e formando esferulitos, intercrescimento simplectítico entre labradorita e a augita, agregados de augita em leque, cristais com hábito esquelético e presença de vidro.

Os pegmatitos de Capanema se diferenciam dos pegmatitos de Barracão pela ocorrência de até 20% de celadonita nos primeiros, além de apresentarem granulação maior, enquanto os basaltos de Capanema são mais finos. Observa-se também maior contraste de granulação, quando se comparam pegmatitos e basaltos, uma vez que os pegmatitos de Capanema são cerca de dez a vinte vezes maiores do que as suas encaixantes, e os de Barracão cerca de cinco a dez vezes maiores.

Quanto à diferença de granulação entre os pegmatitos e basaltos, Walker (1953) sugere que rochas mais finas tendem a ter pegmatitos mais grossos, possivelmente porque ocorre falha na segregação dos constituintes voláteis e minerais tardios, gerando um aumento generalizado ao invés de aumento localizado no tamanho dos cristais. A presença de celadonita nos pegmatitos de Capanema está associada à uma fase secundária hidrotermal que ocupou as porções pegmatíticas que ainda se encontravam em formação, devido à menor pressão, semelhante ao relatado por Puffer & Volkert (2001).

A análise de variação dos óxidos define que os pegmatitos básicos se diferenciam dos basaltos por serem rochas mais evoluídas, com enriquecimento em  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{total}}$  e empobrecimento em  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaO}$ , corroborando os resultados obtidos por Greenough & Dostal (1992), Puffer & Horter (1993), Goff (1996), Hartley & Thordarson (2009) e aqueles de Ferreira (2011) e Silva (2011) em pegmatitos da PMP, no sudoeste do Paraná. Observa-se nos diagramas do tipo Fenner que os pegmatitos de Capanema são diferenciados em dois conjuntos bem

definidos, enquanto aqueles de Barracão apresentam uma tendência a serem mais semelhantes aos basaltos.

A análise dos elementos traço permite verificar que os pegmatitos são mais enriquecidos em elementos traço do que as encaixantes, exceto pelos teores de Sr. Os teores de Sr são empregados para separar as rochas das duas ocorrências. Os teores de K, Rb, Y e ETRP são empregados para separar os pegmatitos das duas ocorrências.

No diagrama normalizado pelo manto primordial de Wood *et al.* (1979) para os elementos traço, os pegmatitos de Capanema têm menor dispersão de valores e diferenciam-se das encaixantes de maneira distinta, com o fracionamento de elementos traço com assinaturas semelhantes à rocha encaixante. Os pegmatitos de Barracão diferenciam-se da encaixante de maneira mais gradativa. No diagrama de McDonough & Sun (1995) normalizado pelo condrito, todas as rochas apresentam enriquecimento em ETR. As rochas de Barracão têm maior enriquecimento em ETRP em relação à rocha encaixante, principalmente a partir do Eu, e os pegmatitos de Capanema têm enriquecimento constante para todos ETR.

Deste modo, tanto em termos petrográficos quanto geoquímicos pode-se afirmar que os pegmatitos básicos de Capanema são mais diferenciados das suas encaixantes do que os pegmatitos básicos de Barracão.

Os modelos de formação dos pegmatitos são inúmeros, podendo atuar associados, porém concordam no que diz respeito à sua formação tardia, quando a inflação do derrame já cessou ou está próximo de cessar, e que essas rochas são mais evoluídas do que as encaixantes. Cita-se: Santin (1969), com a formação por intrusão de um magma mais alcalino enriquecido em voláteis, influência de líquidos hidrotermais e/ou substituição metassomática; Greenough & Dostal (1992), sugerindo a formação por drenagem de líquidos para juntas; Goff (1996), que propõe a formação de instabilidade de densidade, acarretando em zonas de menor pressão e migração de fluidos da porção central do derrame para essas zonas; Philpotts *et al.* (1996), com formação de uma rede cristalina interconectada que compacta-se associada à migração de fluidos; Puffer & Horter (1993), que

propõem a formação de diápiros até a interface com a crosta superior e a perda de voláteis por fraturamento; Hartley & Thordarson (2009), que propõem o modelo de cristalização fracionada de um horizonte de material fundido na parte superior da porção basal do derrame e ascensão desse material segregado.

A hipótese proposta por Puffer & Horter (1993), usando três fatores para explicar a formação dos cristais grandes, parece ser apropriada aos pegmatitos básicos estudados: tempo de residência diferenciado das encaixantes; diminuição da densidade de nucleação devido à fusão dos núcleos cristalinos devido a altas temperaturas no núcleo do derrame e dificuldade de uma renucleação; e aceleração da taxa de difusão e diminuição da viscosidade, facilitada por um sutil aumento de voláteis. Os cristais menores e o vidro devem ser resultantes da despressurização súbita gerada pelas fraturas posteriores. Porém, a diminuição da densidade de nucleação pode ser simplificada pela natural ausência de núcleos cristalinos, uma vez que não se encontram vestígios da fusão de núcleos pré-existent

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecimentos à CAPES, ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da UFPR, ao LAMIR (Laboratório de Análise de Minerais e Rochas), ao LAMIN (Laboratório de Laminação), à Mineropar (Serviço Geológico do Paraná) e ao Projeto Temático intitulado “A Província Magmática Paraná-Etendeka no Brasil: relações temporais e petrológicas entre o magmatismo toleítico e alcalino e suas implicações geodinâmicas” (Processo nº 12/06082-6) e à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo).

## **REFERÊNCIAS**

ANDERSON. A.T.; SWIHART, G.H.; ARTIOLI. G.; GEIGER, C.A. Segregation vesicles. gas filter-pressing, and igneous differentiation. **The Journal of Geology**, v. 92, p. 55-72, 1984.

ARIOLI, E.E. **Arquitetura faciológica da sequência vulcânica e o significado exploratório das anomalias geoquímicas de Elementos do Grupo da Platina (EGP) e metais associados no Sistema Magmático Serra Geral, Estado do Paraná, Brasil**. Curitiba, 2008. 194 p. Teses (Doutorado): Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná.

ARIOLI, E.E. & LICHT, O.A.B. **O Grupo Serra Geral no Estado do Paraná**. Curitiba: Mineropar, 2v. 451p., 2013.

BELLIENI, G.; COMIN-CHIARAMONTI, P.; MARQUES, L.S.; MELFI, A.J.; PICCIRILLO, E.M.; NARDY, A.J.R.; ROISENBERG, A. High- and low-TiO<sub>2</sub> flood basalts from the Paraná plateau (Brazil): petrology and geochemical aspects bearing on their mantle origin. **Neues Jahrbuch für Mineralogie – Abhandlungen**, v. 150, p. 272-306, 1984.

CAROFF, M.; MAURY, R.C.; COTTEN, J.; CLÉMENT, J.P. Segregation structures in vapor differentiated basaltic flows. **Bulletin of Volcanology**, v. 62, n. 3, p. 171–187, 2000.

DE LA ROCHE, H.; LETERRIER, J.; GRANDCLAUDE, P.; MARCHAL, M. A classification of volcanic and plutonic rocks using R<sub>1</sub>R<sub>2</sub> - diagram and major element analyses - Its relationships with current nomenclature: **Chemical Geology**, v. 29, p. 183-210, 1980.

DUNHAM, K.C. Crystal cavities in lavas from the Hawaiian Islands. **American Mineralogist**, v. 18, n. 9, p. 369-385, 1933.



FERREIRA, C.H.N. **Geologia do derrame Salto do Lontra e gênese dos pegmatitos básicos associados, Província Magmática do Paraná, sudoeste do Estado do Paraná**. Curitiba, 2011.

102 p. Dissertações de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná.

GOFF, F. Vesicle cylinders in vapor-differentiated basalt flows. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 71, n. 2–4, p. 167–185, 1996.

GREENOUGH, J.D.; DOSTAL, J. Cooling history and differentiation of a thick North Mountain basalt flow. **Bulletin of Volcanology**, v. 55, p. 63–73, 1992.

HARTLEY, M.E.; THORDARSON, T. Melt segregations in a Columbia River Basalt lava flow: A possible mechanism for the formation of highly evolved mafic. **Lithos**, v. 112, n. 3-4, p. 434–446, 2009.

HELZ R.T.; KIRSCHENBAUM H.; MAINENKO J.W. Diapiric transfer of melt in Kilanea Iki lava lake, Hawaii: a quick, efficient process of igneous differentiation. **Geological Society of America Bulletin**, v. 101, p. 578-594, 1989.

JEFFERSON, C.W.; HULBERT, L.J.; RAINBIRD, R.H.; HALL, G.E.M.; GRÉGOIRE, D.C.; GRINENKO, L.I. Mineral Resource Assessment of the Neoproterozoic Franklin Igneous Events of Arctic Canada: Comparison with the Permo-Triassic Noril'sk-Talnakh Ni-Cu-Pge Deposits of Russia. **Geological Survey of Canada**, Open File 2789, 48 p., 1994.

KONTAK, D.J.; DE WOLFE DE YOUNG, M.Y.; DOSTAL, J. Late-Stage Crystallization History of the Jurassic North Mountain Basalt, Nova Scotia, Canadá. I. Textural and Chemical Evidence for

Pervasive Development of Silicate-Liquid Immiscibility. **The Canadian Mineralogist**, v. 40, n. 5, p. 1287-1311, 2002.

LACROIX, A. Les pegmatitoides des roches volcaniques a facies basaltiques: a propos de celles du Wei-Tchang. **Bulletin of the Geological Society of China**, v. 8, p. 45-49, 1929.

LICHT, O.A.B. & Lima, E.F. de. A Associação dos gaps de Si-Zr-Ti-P na subdivisão das rochas da Província Ígnea do Paraná. In: 47° Congresso Brasileiro de Geologia, 2014, Salvador. **Anais**, Salvador: SBG, 2014. v. CD-ROM.

MACDONALD, G.A. Pahoehoe, aa and block lava. **American Journal of Science**. v. 251, p. 169 – 191, 1953.

MANTOVANI, M.S.M.; MARQUES, L.S.; SOUSA, M.A.; ATALLA, L.; CIVETTA, L.; INNOCENTI, F. Trace Element and Strontium Isotope Constraints of the Origin and Evolution of Paraná Continental Flood Basalts of Santa Catarina State (Southern Brazil). *Journal of Petrology*, v. 26, p. 187-209, 1985.

MARSH, B.D. Igneous processes in sills. In: Pacific Rim Congress 90, 1990, Victoria (Australia). **Anais**. Victoria: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, v. 2, p. 83-91.

MCDONOUGH W.F. & SUN S. The composition of the Earth. **Chemical Geology**, v. 120, p.223– 253, 1995.

MIDDLEMOST, E.A.K. Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. **Chemical Geology**, v. 77, p. 19-26, 1989.

PEATE, D.W. **Stratigraphy and petrogenesis of the Paraná Continental Flood Basalts, Southern Brazil**. XXX, 1989. 359 p. Ph.D thesis, Open University.

PEATE D.W; HAWKESWORTH C.J.; MANTOVANI M.S.M. Chemical Stratigraphy of the Paraná Lavas (South America): Classification of Magma Types and their Spatial Distribution. **Bulletin of Volcanology**, v. 55, p. 119-139, 1992.

PHILPOTTS, A.R.; CARROLL, M.; HILL, J.M. Crystal-Mush Compaction and the Origin of Pegmatitic Segregation Sheets in a Thick Flood-Basalt Flow in the Mesozoic Hartford Basin, Connecticut. **Journal of Petrology**, v. 37, n. 4, p. 811-836, 1996.

PUFFER, J.H.; HORTER, D.L. Origin of pegmatitic segregation veins within flood basalts. **Geological Society of America Bulletin**, v. 105, n. 6, p. 738–748, 1993.

PUFFER, J.H. & VOLKERT, R.A. Pegmatoid and gabbroid layers in Jurassic Preakness and Hook Mountain Basalts, Newark Basin, New Jersey. **The Journal of Geology**, v. 109, p. 585-601, 2001.

ROLLINSON, H. **Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation**. London: Longman, 352 p, 1993.

SANTIN, S.F., Pegmatitoides in the horizontal basalts of the Lanzarote and Fuerteventura Islands, Series I, **Bulletin Volcanologique**, v. 33, p. 989-1007, 1969.

SELF, S.; KESZTHELYI, L.; THORDARSON, T. The importance of pahoehoe. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 26, p. 81-110, 1998.

SELF, S.; THORDARSON T.; KESZTHELYI, L. Emplacement of continental flood basalt lava flows, Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism. *Geophysical Monograph*, v. 100, p. 381–410, 1997.

SILVA, K.F.B. **Caracterização petrográfica e geoquímica de pegmatíticos básicos, encaixados em derrames basálticos do Grupo Serra Geral, no Estado do Paraná.** Campinas, 2011. 93 p. Trabalhos de Conclusão de Curso, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas.

VASCONCELLOS, E. M. G.; LICHT, O. A. B.; BRAGA, L. S.; BITTENCOURT, A. V. L. Gabros da Bacia do Paraná: aspectos petrográficos e geoquímicos. In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA; I SIMPÓSIO DE GEOQUÍMICA DOS PAÍSES DO MERCOSUL, 2001. **Anais**, Curitiba: Sociedade Brasileira de Geoquímica, 2001.

WALKER, F. The pegmatitic differentiates of basic sheets. **American Journal of Science**, v. 251, n.1, p. 41–60, 1953.

WOOD, D.A.; TARNEY, J.; VARET, J.; SAUNDERS, A.D.; BOUGAULT, H.; JORON, J.L.; TREUIL, M.; CANN, J.R. Geochemistry of basalts drilled in the North Atlantic by IPOD Leg. 49: implications for mantle heterogeneity. **Earth Planetary Science Letters**, v. 42, n. 1, p.77-97, 1979.

## 5.2 PETROGRAFIA

Os pegmatitos de Barracão são mesoscopicamente identificados pelas cores avermelhadas, devido à percolação de óxidos/hidróxidos de ferro, com cristais de tamanho médio de 0,2 cm, podendo atingir 0,5 cm, e pela presença frequente de microvesículas milimétricas e, menos frequente, de vesículas (Figura 26a). Os pegmatitos de Capanema são mesoscopicamente identificados pelos cristais de augita dispostos em leque, com hastes encurvadas ou retas, com 0,5 a 1,0 cm em média e atingindo 6,0 cm. As rochas são cinzas a castanhas, frequentemente esverdeadas pela presença de celadonita principalmente em meio à matriz (Figura 26b). O contato dos pegmatitos com as encaixantes, tanto em Capanema quanto em Barracão é abrupto.

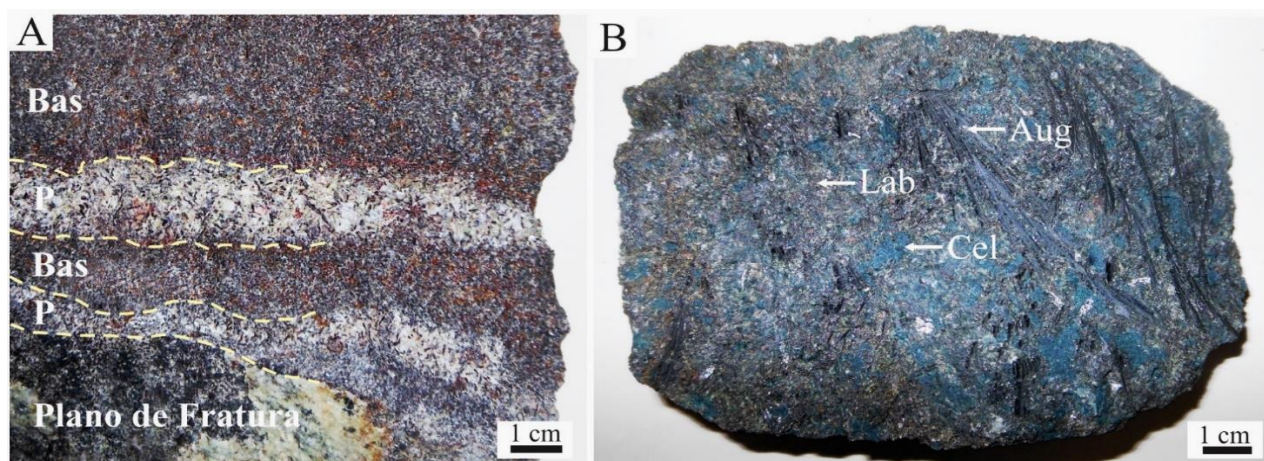


Figura 26 - (A) Amostra de níveis pegmatíticos “P” e níveis basálticos “Bas” de Barracão. Ocorre também um plano de fratura preenchido por carbonato; (B) Amostra de pegmatito de Capanema, com leques de augita (Aug), prismas de labradorita (Lab), com a presença de celadonita (Cel).

### 5.2.1 Pegmatitos

Em seção delgada, os pegmatitos de Barracão são faneríticos porfiríticos, com granulação média em matriz fina a muito fina. É frequente a ocorrência de microvesículas milimétricas e menos frequente de vesículas maiores, que chegam a 1,5 cm. A textura é predominantemente subofítica, podendo também ocorrer textura intergranular. A granulação dos pegmatitos é cinco a dez vezes maior do que a do basalto encaixante (Figura 27).

Os pegmatitos de Capanema são faneríticos porfiríticos, de granulação média a grossa em matriz fina a muito fina, com estrutura variolítica e texturas subofítica e,

localmente, intergranular. A granulação dos pegmatitos é dez a vinte vezes maior do que a do basalto encaixante. A celadonita representa até 20% da rocha e ocorre disseminada na matriz e, em menor quantidade, como preenchimento de microcavidades. Em campo, nota-se também a presença de vidro preenchendo amígdalas, além de carbonato. Percebe-se também que os fenocristais de augita se ramificam das bordas em direção ao centro dos pegmatitos.

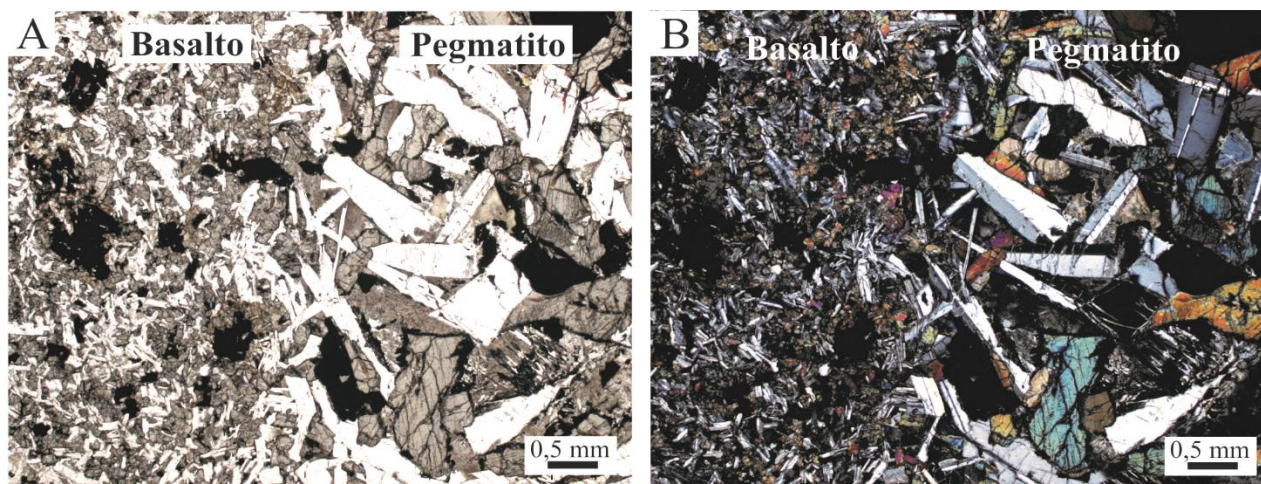


Figura 27 - Fotomicrografia do contato entre o pegmatito básico e o basalto de Barracão: (A) em P//; (B) em PX.

Ao microscópio, a assembleia mineral é composta por 40 a 60% de labradorita, 25 a 35% de augita e 10 a 15% de minerais opacos. Subordinadamente ocorrem argilominerais, hidróxidos de ferro, apatita e vidro vulcânico. Exclusivamente em Capanema, ocorre até 20% de celadonita.

A labradorita ocorre em duas gerações de cristalização. A primeira como fenocristais com média de 0,8 mm, chegando a 1,4 mm, em Barracão e com granulação média de 1 a 3 mm, podendo atingir até pouco mais de 5 mm, em Capanema (Figura 28a). Em ambas as ocorrências os cristais são subédricos a euédricos, ocasionalmente zonados, e alguns cristais exibem bordas corroídas, com processo de argilização intermediária. Observa-se a feição de cauda de andorinha em cristais de plagioclásio (Figura 28b). Fraturas são recorrentes, com preenchimento por hidróxidos de ferro e argilominerais.

A segunda fase é formada por cristais de labradorita de granulação fina, com média de 0,1 a 0,2 mm em Barracão e de 0,2 mm em Capanema, predominantemente intersticiais aos fenocristais de labradorita da primeira fase. Exibem concentrações de cristais com bordas interdigitadas e localmente o hábito radial dos cristais define texturas



esferulíticas. Os cristais apresentam um nível avançado de argilização e encontram-se turvos.

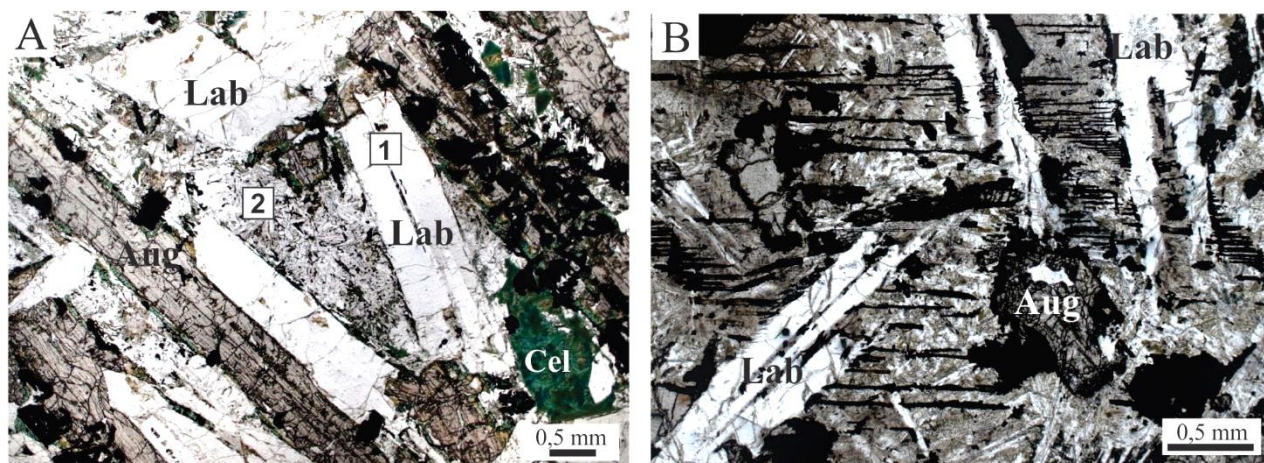


Figura 28 - Fotomicrografias (A) Gerações de cristalização de labradorita (Lab) no pegmatito básico, polarizadores paralelos (P//). Geração “1” representada por fenocristais de labradorita. Geração “2” geração matricial, representada por cristais menores de labradorita. Pegmatito de Capanema; (B) Fenocristais de labradorita com terminações em cauda de andorinha. Pegmatito de Barracão. P//.

A augita ocorre em duas fases principais: a primeira com cristais dispostos em forma de leque, podendo ocorrer intercrescimento simplectítico com labradorita (Figura 29a). São subédricos médios com granulometria de 0,6 a 1,0 mm em Barracão e, em Capanema, com cristais de granulação média, de 3,5 a 5 mm, com poucos cristais atingindo 1 cm, subédricos, ripiformes, com ripas encurvadas ou retas, geralmente com opacos esqueletais associados nas laterais com porções externas cloritizadas (Figura 29b). A segunda fase constitui a matriz, em cristais de granulação fina, menores do que 0,2 mm em ambos os afloramentos, ocorrem em menor porcentagem, como cristais subédricos a anédricos, normalmente intersticiais.

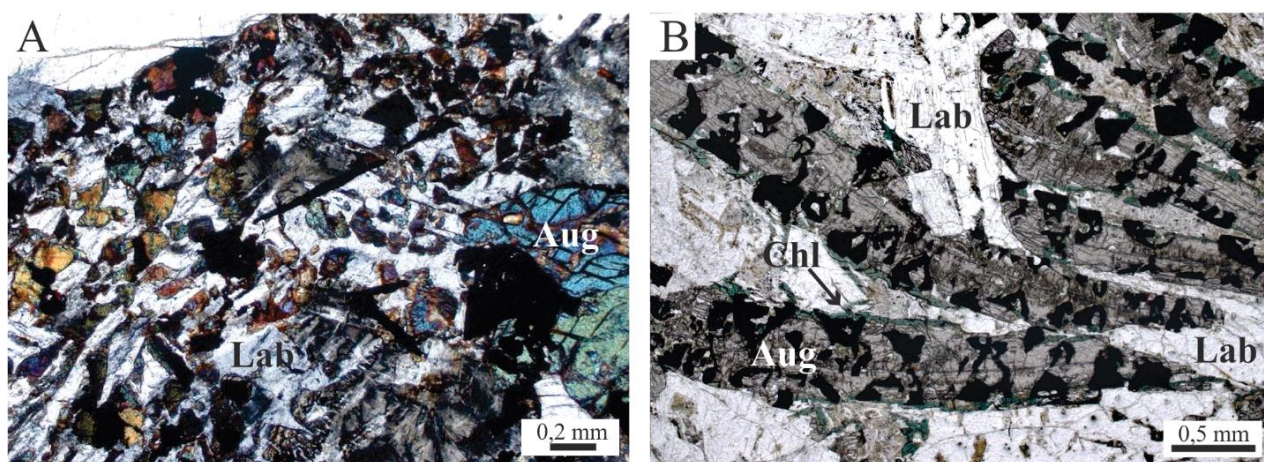


Figura 29 - (A) Intercrescimento simplectítico de augita e labradorita, polarizadores cruzados (PX). Pegmatito de Barracão; (B) Cristais ripiformes de augita (Aug), com minerais opacos esqueletais. Nas bordas, formam-se cristais de clorita (Chl).



Os agregados fibrorradiados de celadonita ocorrem apenas em Capanema, principalmente em meio à matriz da rocha (Figura 30a). Encontra-se, em alguns casos, contornando cristais de augita e de labradorita. É também comum encontrar celadonita preenchendo cavidades arredondadas (Figura 30b).

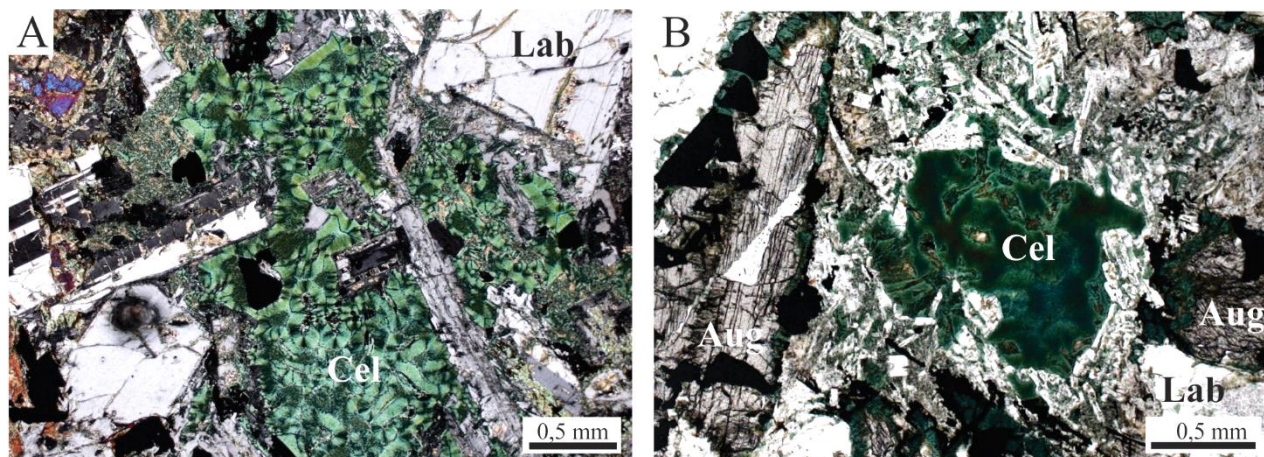


Figura 30 - Cristais de celadonita de Capanema. (A) Cristais em amígdala. P//; (B) Cristais em agregados fibrorradiados na matriz. PX.

Opacos ocorrem principalmente junto aos cristais de augita, com granulação média de aproximadamente 0,2 a 0,5 mm em Barracão e 0,3 a 0,8 mm em Capanema, com seção triangular com feições esqueléticas ou espinha de peixe (Figura 31a), caracterizados ao MEV como ilmenita e magnetita. Em uma segunda fase de cristalização com granulação fina, percebem-se cristais de opacos anédricos disseminados na matriz e aciculares preenchendo planos de fraqueza em outros cristais e formando filamentos (Figura 31b).

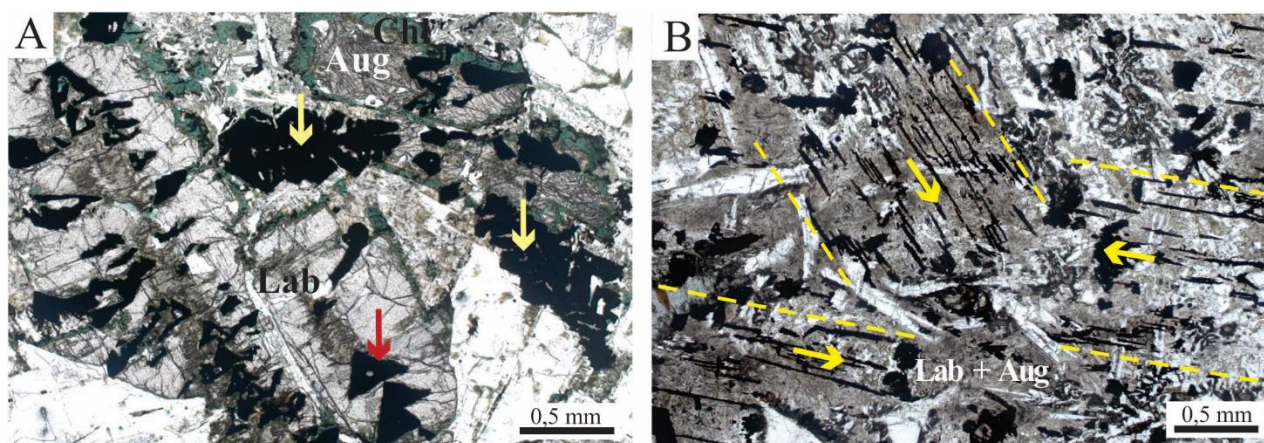


Figura 31 - Minerais opacos: (A) com feições de espinha de peixe (flecha amarela) e em seção triangular esquelética (flecha vermelha); (B) cristais aciculares em direções distintas, concentrando-se junto aos cristais de labradorita e augita da segunda geração.



Os argilominerais ocorrem como alteração na borda de fenocristais de augita e plagioclásio e também na matriz, tornando os demais cristais turvos. O hidróxido de ferro ocorre subordinadamente, percolando fraturas, decorrente da alteração dos opacos.

Ocorre, ainda, vidro vulcânico na matriz, turvo e com aspecto maciço ou dendrítico, comumente cloritizado.

Subordinadamente, ocorre apatita acicular com granulação muito fina. Carbonato ocorre no preenchimento de cavidades (Figura 32).

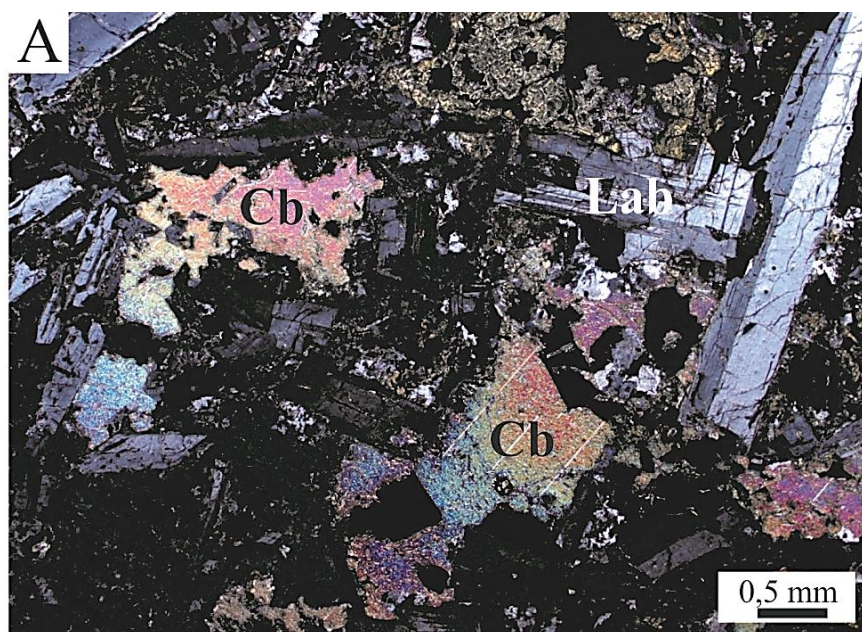


Figura 32 - Cristais de carbonato (Cb) preenchendo cavidades e interstícios. PX. Pegmatito Capanema.

### 5.2.2 Basaltos

Em seção delgada, os basaltos são compostos por 45-60% de labradorita, 30-40% de augita e 10-20% de minerais opacos. Em porcentagem subordinada ocorrem hidróxidos de ferro, argilominerais, clorita e vidro.

Os basaltos de Barracão são cinza avermelhados, faneríticos porfiríticos, com matriz de granulação fina, variando de 0,2 mm a 0,4 mm e fenocristais finos a médios, atingindo 1,2 mm, com estrutura variolítica e textura predominantemente hipohialina, normalmente subofítica, localmente intergranular. Exibem granulação mais grossa do que os basaltos de Capanema (Figura 33a).

Os basaltos de Capanema possuem granulação mais fina e cor cinza escura a castanha, por vezes levemente esverdeada, são faneríticos porfiríticos, com granulação fina a muito fina, em média de 0,1 mm a 0,25 mm, com poucos cristais inferiores a 0,1mm. Os fenocristais são finos a médios, podendo atingir 1,4 mm (Figura 33b). O basalto possui estrutura variolítica e textura hipohialina, normalmente subofítica e restritamente intergranular.

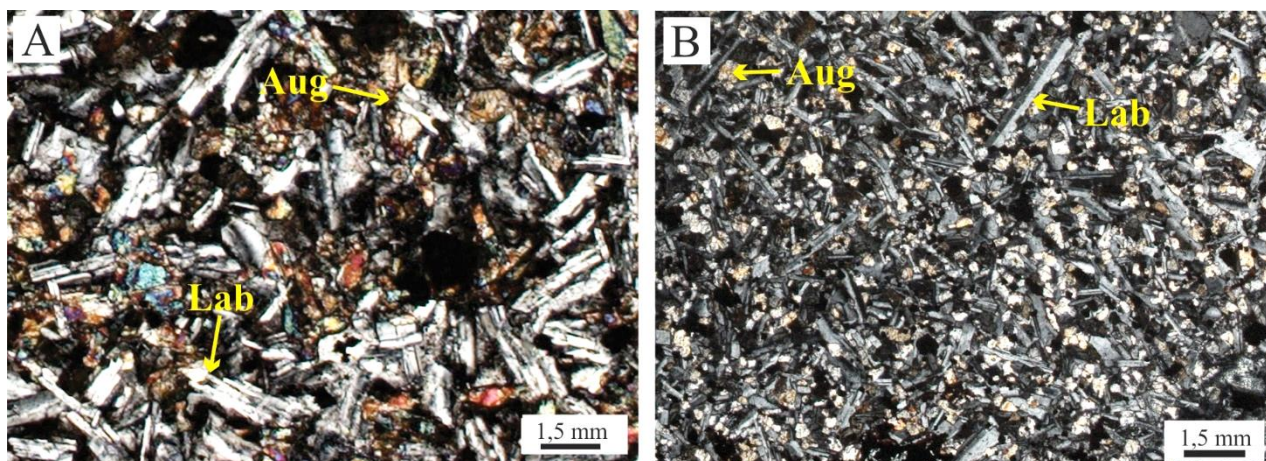


Figura 33 – Fotomicrografias da granulação: (A) basalto de Barracão; (B) basalto de Capanema. P//.

Os cristais de labradorita são cristalizados em duas fases (Figura 34a): em Barracão a primeira geração tem granulação fina à média, em média com 0,8 mm, podendo atingir 1,2 mm. A segunda geração forma a matriz do basalto, com tamanho médio de 0,4 mm. Em Capanema, a primeira fase é de fenocristais de granulação fina a média, subédricos, com até 1,4 mm em seu eixo maior, não ultrapassando 0,8 mm. A segunda geração forma a matriz, com granulação fina a muito fina, com tamanhos inferiores a 0,2 mm no eixo maior, subédricos, ripiformes. É comum a presença de inclusões de augita. Os cristais de plagioclásio são ripiformes, com bordas tanto retilíneas quanto serrilhadas.

Como fenocristais, encontram-se também cristais de augita, subédricos a anédricos, com 0,2 a 0,4 mm. Normalmente são arredondados, com fraturas preenchidas por hidróxido de ferro, com bordas interdigitadas. A segunda geração de augita é observada na matriz, preenchendo os espaços intersticiais dos cristais maiores, subédricos a anédricos, de granulação muito fina a fina, em média de 0,1 mm em Barracão e inferiores a 0,1 em Capanema.

Os cristais de opacos podem ser divididos em: i) microfenocristais com granulação fina, com tamanhos aproximados de 0,3 mm em Barracão e 0,1 mm em Capanema,



anédricos com bordas serrilhadas a subédricos, poiquilíticos em alguns casos, associados aos hidróxidos de ferro; e ii) cristais de granulação muito fina, formando a matriz nas duas ocorrências estudadas (Figura 34b).

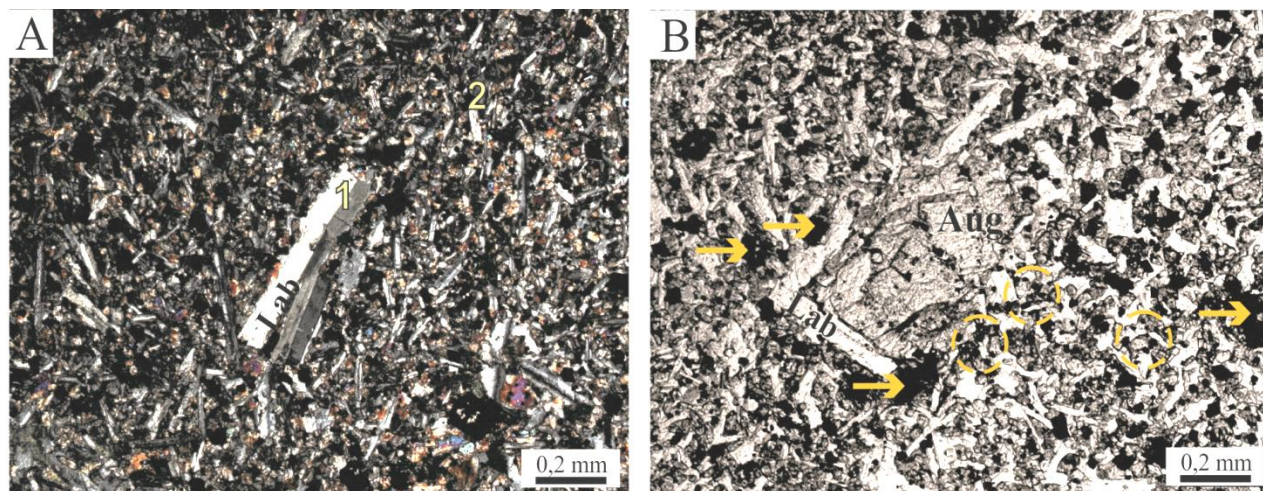


Figura 34 - Fotomicrografias de basaltos de Capanema: (A) Diferentes gerações de cristalização de labradorita no basalto. Geração “1” representada pela primeira geração de labradorita, composta por fenocristais. Geração “2” representada por cristais ripiformes menores de labradorita, compondo a matriz. PX; (B) duas gerações de cristalização de minerais opacos. A primeira geração representada por flechas e a segunda geração representada por círculos. P//.

### 5.3 INTERPRETAÇÃO GEOQUÍMICA

#### 5.3.1 Óxidos

Foram analisadas 23 amostras, sendo 13 de pegmatitos básicos e 10 de basaltos encaixantes. No Apêndice 3 encontram-se os dados dos óxidos em porcentagem em peso, não recalculados para base anidra, bem com os valores de LOI (*Loss on Ignition*).

Todas as rochas analisadas são supersaturadas em SiO<sub>2</sub>, com quartzo normativo variando entre 1,45 e 8,62%. Os outros minerais normativos são: plagioclásio (32,82 a 44,62%), ortoclásio (6,09 a 18,56%), diopsídio (12,71 a 21,45%), hiperstênio (13,57 a 18,34%), ilmenita (4,16 a 7,27%), magnetita (4,03 a 8,19%) e apatita (0,58 a 0,97%).

No diagrama R<sub>1</sub>R<sub>2</sub> (R<sub>1</sub>=4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti) x R<sub>2</sub>=6Ca+2Mg+Al) de De La Roche *et al.* (1980) (Figura 35) as rochas dividem-se em quatro campos. As rochas encaixantes de Capanema concentraram-se no campo dos basaltos, já as rochas hospedeiras de Barracão concentraram-se no campo dos andesi-basaltos. Os pegmatitos de Capanema

situam-se no campo dos latitos e os pegmatitos de Barracão dividiram-se entre os campos do latiandesito e andesi-basalto.

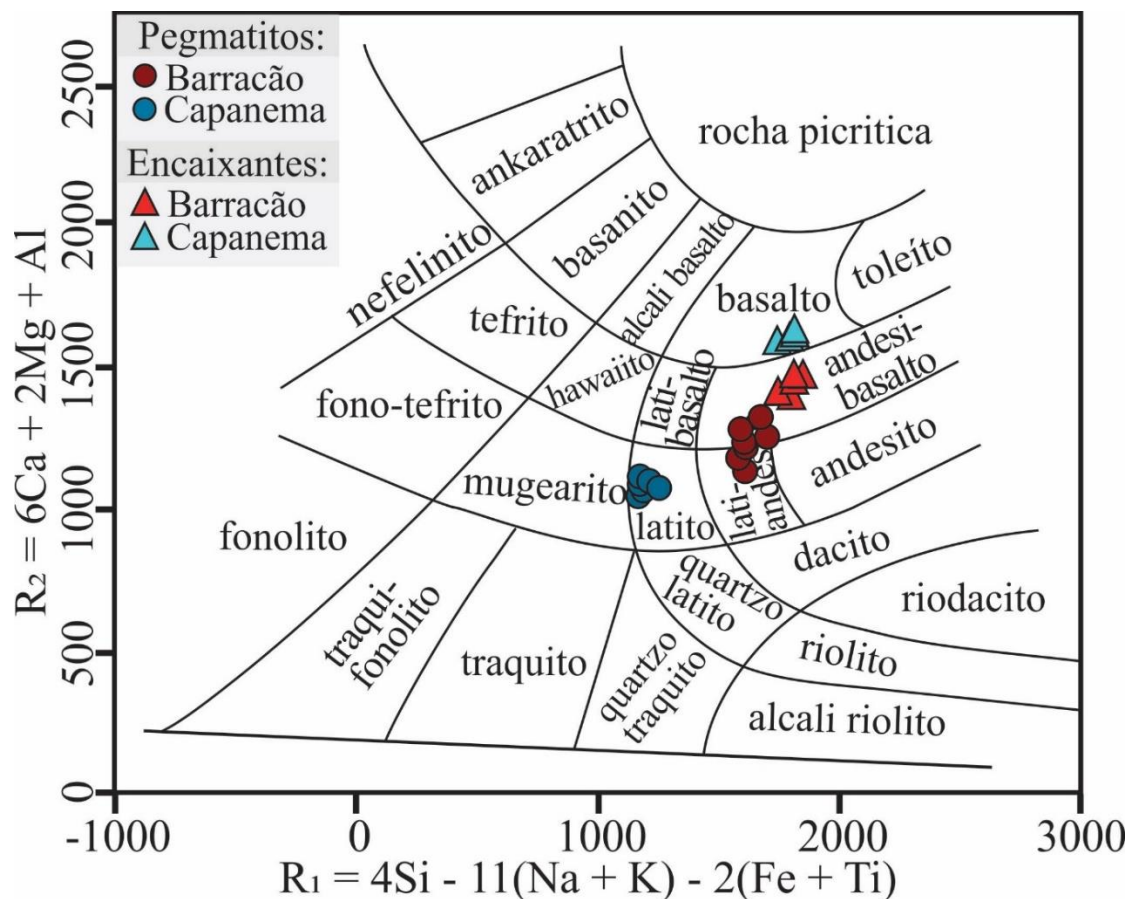


Figura 35 - Diagrama milicatônico  $R_1R_2$  ( $R_1=4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)$  x  $R_2=6Ca+2Mg+Al$ ) de De La Roche *et al.* (1980).

No diagrama TAS (total álcalis-sílica -  $[Na_2O+K_2O] \times SiO_2$ ), de Le Maitre *et al.* (1989) (Figura 36), todas as rochas concentram-se no campo do basalto, exceto as amostras dos pegmatitos básicos de Capanema, que se concentraram no campo dos traquibasaltos. Tal fato ocorre devido aos teores mais altos de  $K_2O$  que ocorrem na celadonita, visto que este mineral está concentrado nessas rochas e sua fórmula é  $K(Mg,Fe^{2+})(Fe^{3+},Al)[Si_4O_{10}](OH)_2$ . Além disso, percebe-se que há naturalmente um enriquecimento de  $Na_2O+K_2O$  nos pegmatitos básicos.

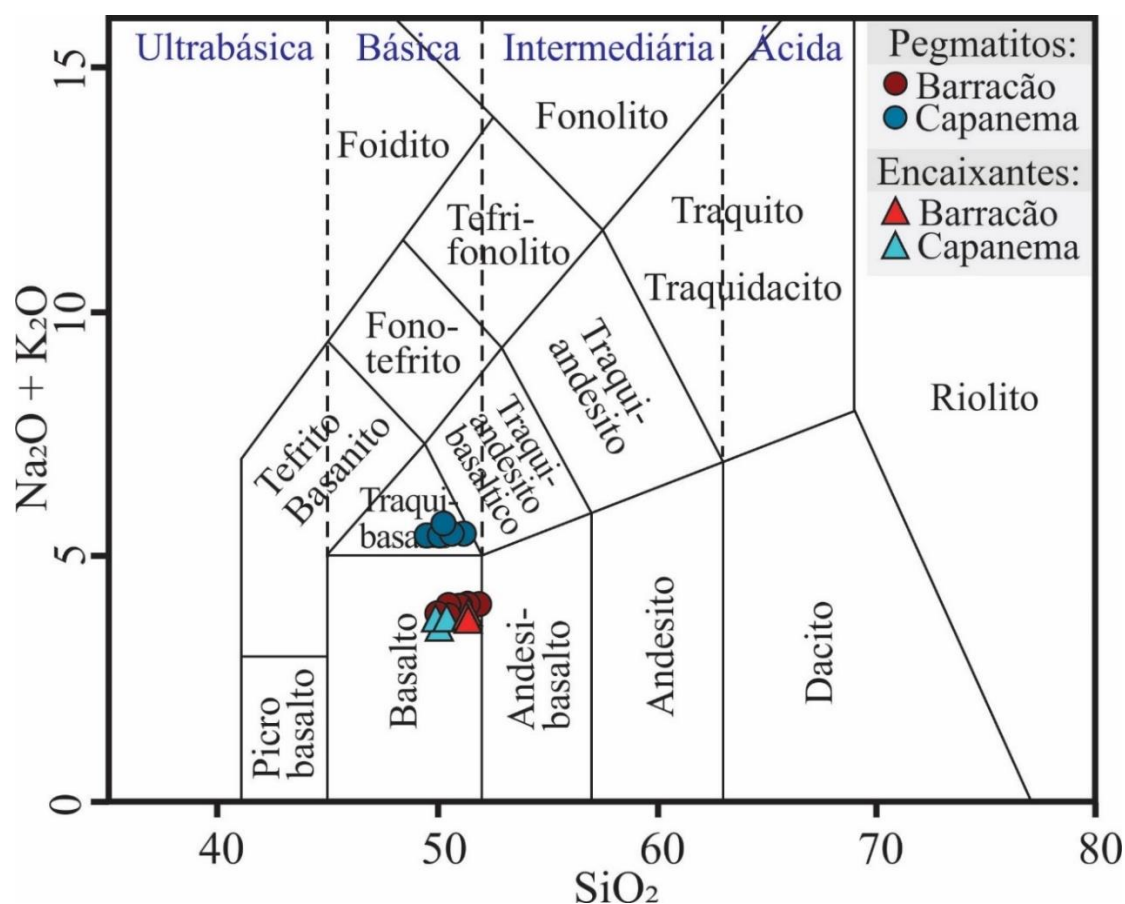


Figura 36 - Diagrama TAS (total álcalis-sílica -  $[\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}] \times \text{SiO}_2$ ) de Le Maitre *et al.* (1989)

Quando projetadas no diagrama AFM ( $[\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}] \times [\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3] \times \text{MgO}$ ) de Irvine & Baragar (1971) (Figura 37), as rochas estudadas concentram-se no campo da série toleítica, novamente com os basaltos com maior porcentagem de MgO e os pegmatitos enriquecidos em FeO. Ambos os grupos possuem teores semelhantes de álcalis.

Ao projetar as amostras no diagrama catiônico ( $\text{Al} \times [\text{Fe}_{\text{total}} + \text{Ti}] \times \text{Mg}$ ) de Jensen (1976) (Figura 38), todos os pontos agruparam-se no campo dos basaltos toleíticos de alto ferro. Observa-se que os pegmatitos básicos são mais enriquecidos em Fe e Ti, enquanto os basaltos encaixantes são mais enriquecidos em Mg, o que permite inferir que os últimos são menos evoluídos.

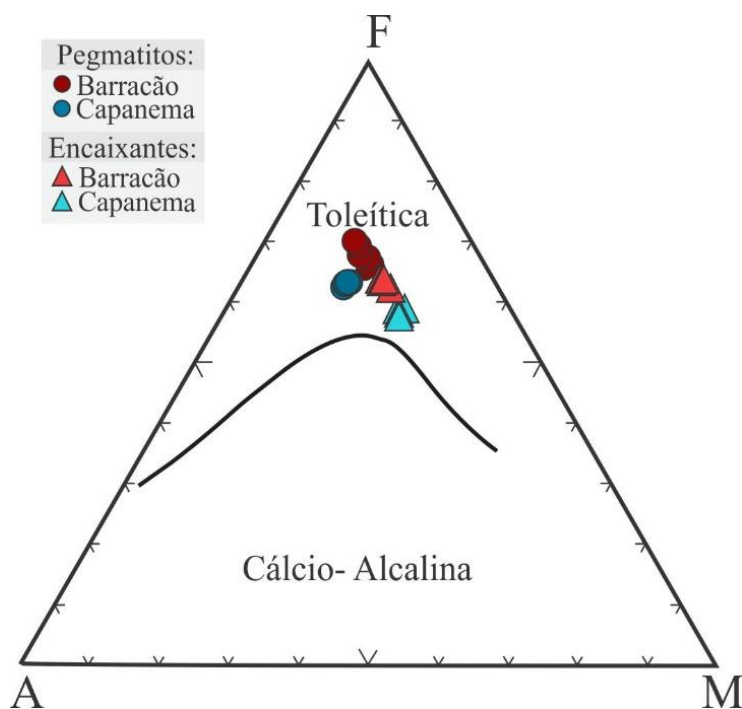


Figura 37- Diagrama AFM [A=(Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) – F= (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) – M= (MgO)] com a divisão de Irvine & Baragar (1971).

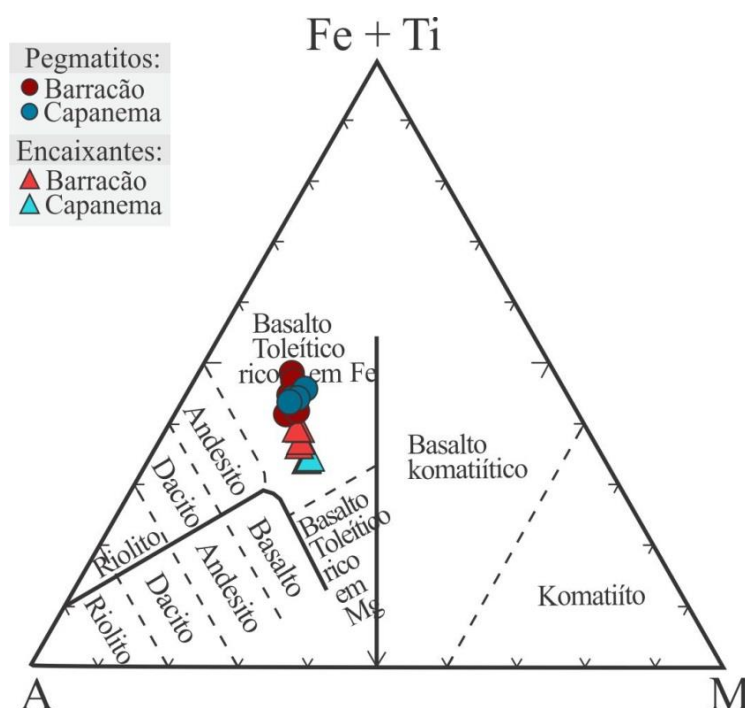


Figura 38 - Diagrama Al x (Fetotal +Ti) x Mg de Jensen (1976).

A interpretação dos dados em diagramas de variação do tipo Fenner, utilizando o MgO como óxido discriminante (Figura 39) define enriquecimento em TiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3total</sub>, um leve enriquecimento em Na<sub>2</sub>O, empobrecimento em MgO, CaO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e valores de SiO<sub>2</sub> semelhantes nos pegmatitos, com relação aos basaltos.



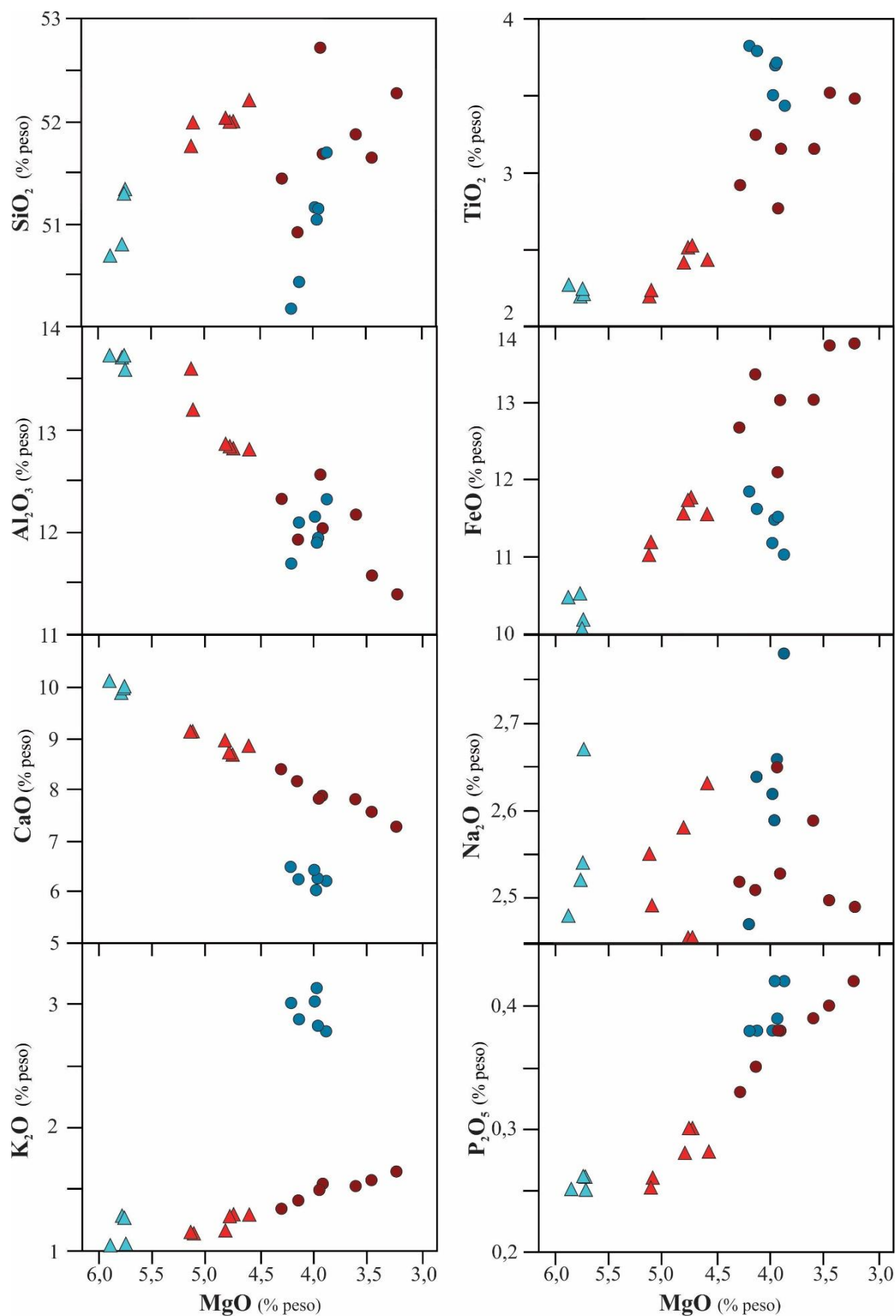


Figura 39 - Diagramas de variação do tipo Fenner, para óxidos maiores utilizando MgO como óxido fracionante, para as rochas basálticas encaixantes e os pegmatitos básicos de Barracão e Capanema.



O empobrecimento em MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e CaO é relacionado ao fracionamento de augita e labradorita na encaixante e no pegmatito. O FeO está incorporado na augita e, junto com o TiO<sub>2</sub>, em minerais opacos (magnetita e ilmenita), abundantes nos pegmatitos. Em Capanema, há mais Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, indicando maior incorporação na ilmenita e magnetita. Nos pegmatitos de Capanema, observa-se um aumento anômalo de K<sub>2</sub>O, explicado pela presença de celadonita. Os teores de Na<sub>2</sub>O estão relacionados ao plagioclásio ligeiramente mais sódico nos pegmatitos. Os teores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> estão associados à ocorrência de apatita. As rochas de Capanema têm comportamento mais variado entre encaixante e pegmatito, com um agrupamento de pontos bem definido. Nas de Barracão, há uma gradação desde os basaltos mais primitivos até os pegmatitos mais evoluídos de forma quase linear. Assim, sugere-se que, em termos geoquímicos, as segregações de Capanema são mais diferenciadas das suas encaixantes do que as de Barracão.

### 5.3.2 Elementos traço e terras raras (ETR)

Pelo comportamento dos elementos traço, percebe-se que elementos compatíveis (por exemplo Ni e Sr) tendem a concentrar-se nos basaltos, enquanto elementos incompatíveis de grande raio iônico e cargas pequenas (LILE - *large ion lithophile elements*), como o Rb, ou elementos de altas valência (HFS - *high field strength*), como o Ti, tendem a se concentrar nas fases líquidas por não contribuírem na formação dos primeiros minerais a serem formados (Rollinson, 1993). Os teores das análises dos elementos traço e ETR encontram-se no Apêndice 3.

Os diagramas multielementares para elementos traço foram normalizados pelo manto primordial de Wood *et al.* (1979) para as rochas de Capanema e Barracão. Ambos os pegmatitos são enriquecidos em todos elementos traço, à exceção do Sr. A forte anomalia negativa em Sr, principalmente nos pegmatitos, sugere que houve fracionamento de labradorita durante o processo de cristalização (Figura 40).

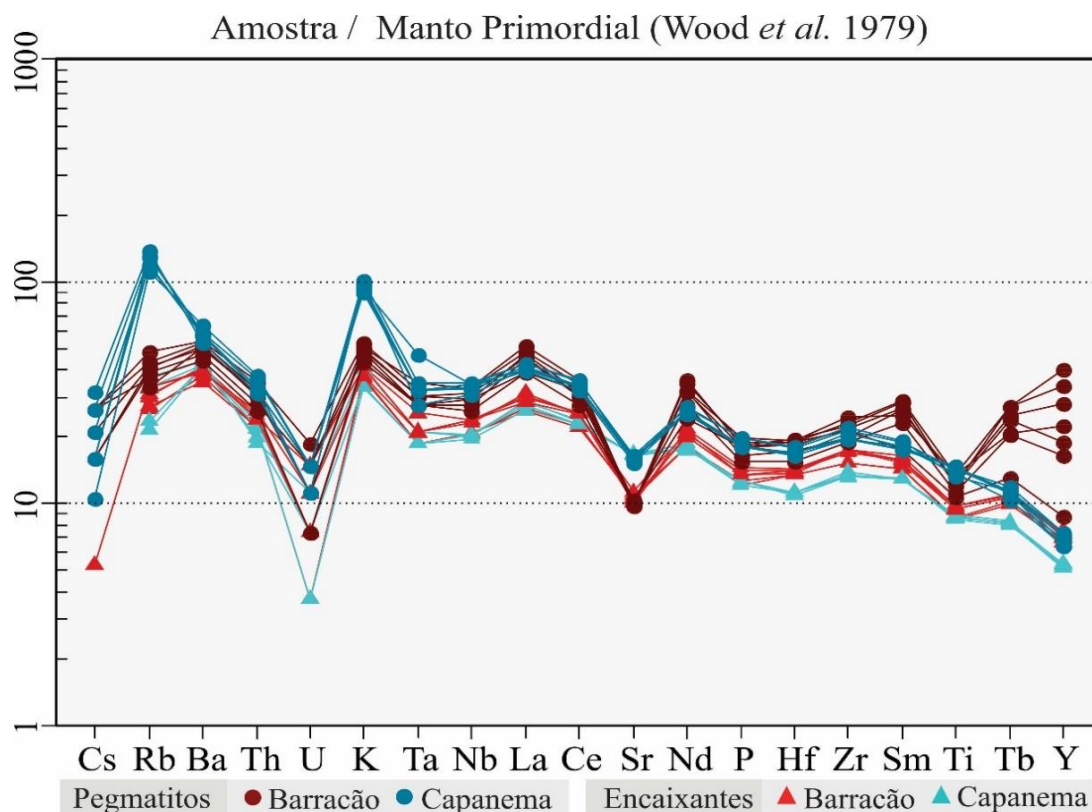


Figura 40 - Diagrama multielementares para elementos traço normalizados para o manto primordial de Wood *et al.* (1979) para as rochas encaixantes e os pegmatitos básicos de Barracão e Capanema.

No diagrama multielementar para elementos traço normalizados pelo manto primordial de Wood *et al.* (1979) (Figura 41), nota-se que os pegmatitos de Barracão têm, em geral, valores que diferenciam-se gradativamente das rochas encaixantes, enquanto os pegmatitos de Capanema têm uma dispersão menor. Esse comportamento também é observado com relação aos óxidos e provavelmente ocorra por terem um grau de fracionamento maior ao serem formados.

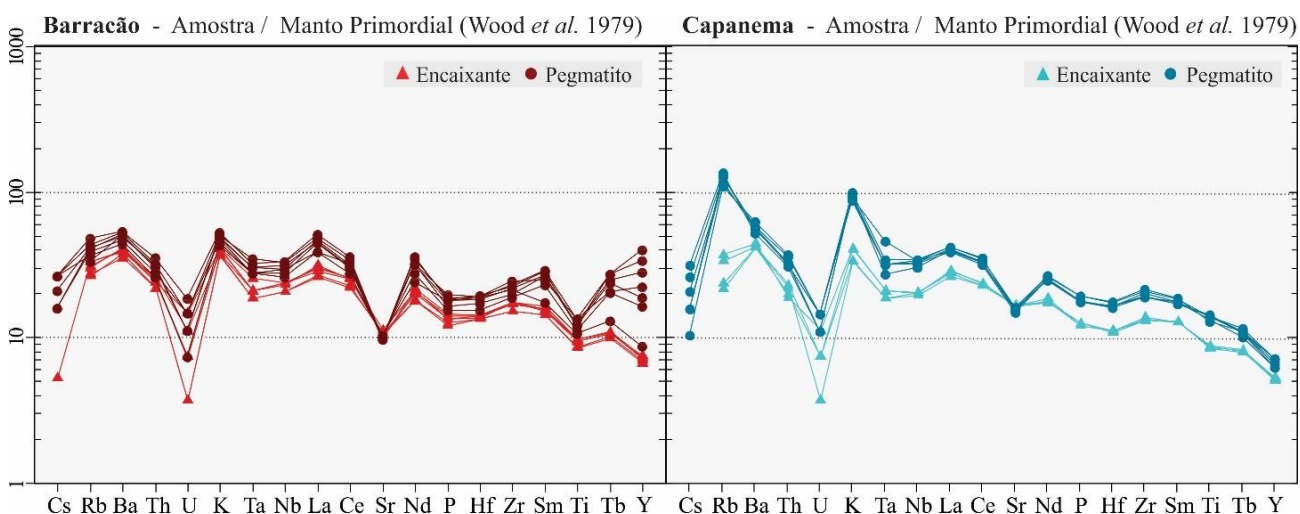


Figura 41 - Comparação entre as rochas encaixantes e os pegmatitos básicos de Barracão e Capanema nos diagramas multielementares para elementos traço normalizados pelo manto primordial de Wood *et al.* (1979).

Nos diagramas multielementares para elementos traço normalizando os pegmatitos pelas rochas encaixantes de Barracão e Capanema (Figura 42), nota-se que os pegmatitos de Capanema têm anomalias menores, com fracionamento de elementos traço com razões mais semelhantes com relação à encaixante.

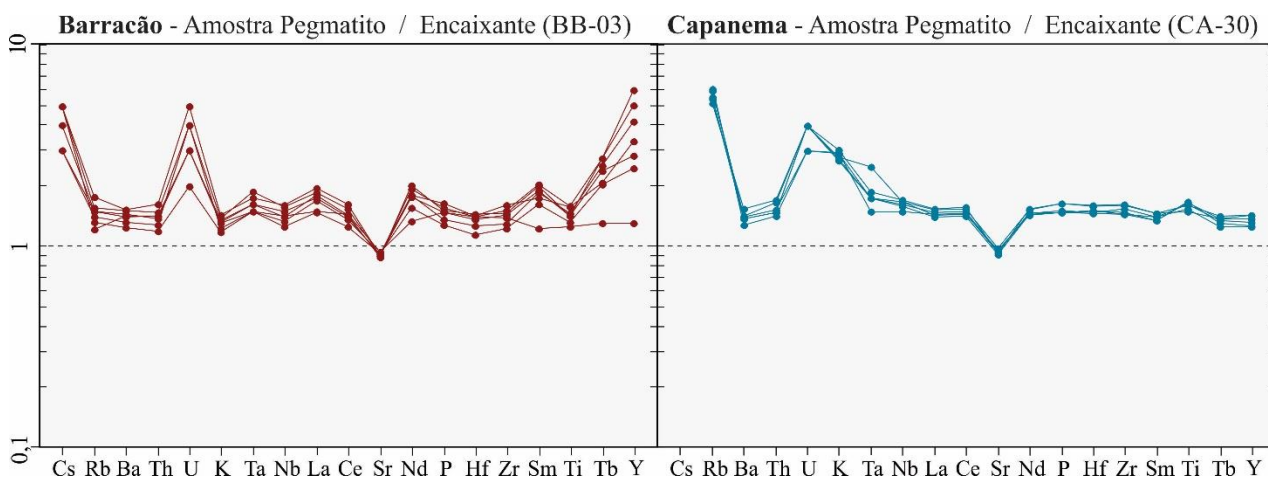


Figura 42 - Diagrama multielementares para elementos traço a partir da normalização dos pegmatitos pela amostra de rocha encaixante mais primitiva de cada uma das ocorrências.

No diagrama multielementar para elementos traço normalizados para o manto primordial de Wood *et al.* (1979) (Figura 43) nota-se que os pegmatitos de Capanema diferenciam-se por serem levemente mais enriquecidos em LILE e notavelmente enriquecidos em Rb e K em comparação aos pegmatitos de Barracão. Os pegmatitos de Barracão diferenciam-se por serem enriquecidos em ETRP, padrão também observado nas rochas encaixantes desta região e, notavelmente, enriquecidos em Y tanto em comparação às encaixantes quanto aos pegmatitos de Capanema.

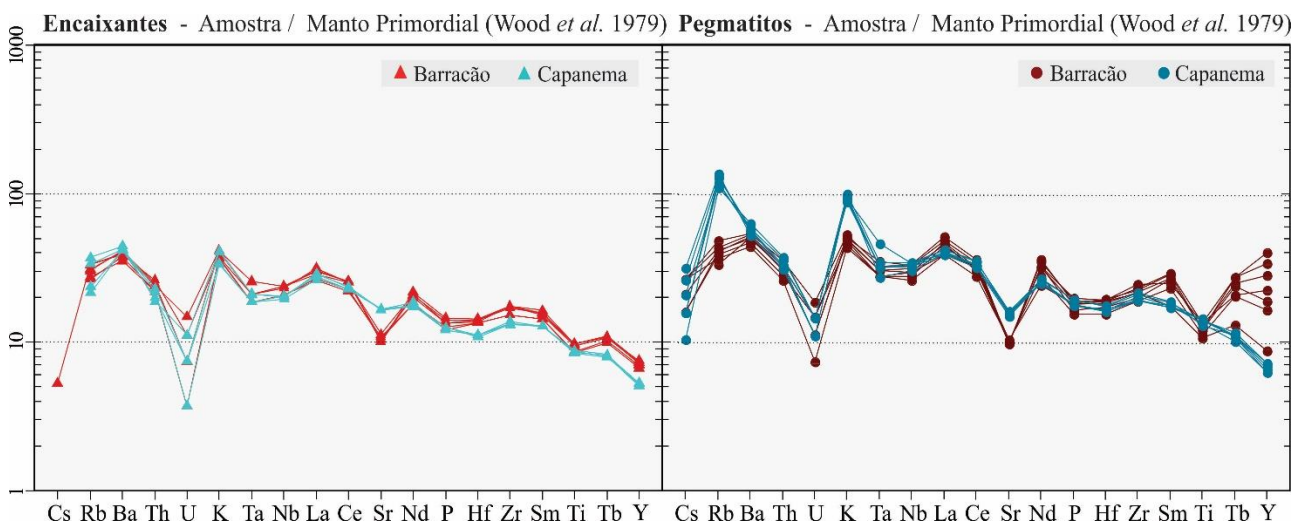


Figura 43 - Comparação entre as rochas encaixantes e os pegmatitos básicos de Barracão e Capanema nos diagramas multielementar para elementos traço normalizados para o manto primordial de Wood *et al.* (1979).

O Sr distingue bem as rochas de Barracão e Capanema (Figura 44), considerando a sua concentração nos pegmatitos básicos e nas encaixantes. Os valores em Barracão variam entre 222,5 e 258,8  $\mu\text{g/g}$ . Em Capanema, variam entre 350,8 e 385,0  $\mu\text{g/g}$ .

As anomalias positivas de Y, com teores de 2 a 5 vezes mais abundantes nos pegmatitos do que nas encaixantes de Barracão (Figura 44), podem indicar uma fonte sem granada, que não reteve o elemento e ficou concentrado nas fases finais de cristalização, provavelmente na apatita.

A anomalia positiva de K nos pegmatitos de Capanema é devida à presença de alta porcentagem de celadonita, também relacionada à anomalia de Rb (Figura 44). Devido às similaridades químicas entre esses dois elementos, é possível que ocorra substituição por Rb no lugar do K, como é observado em celadonita estudada por Innocent *et al.* (1997).

Os altos teores de Ni para os basaltos encaixantes de Capanema (Figura 44) refletem um comportamento mais primitivo, acompanhando a abundância de MgO nessas rochas, sugerindo que não tenha havido fracionamento de olivina na fonte. O Ni deve estar associado à magnetita e à augita nas encaixantes de Capanema, devido aos altos coeficientes de partição desses elementos nesses minerais, segundo Rollinson (1993).

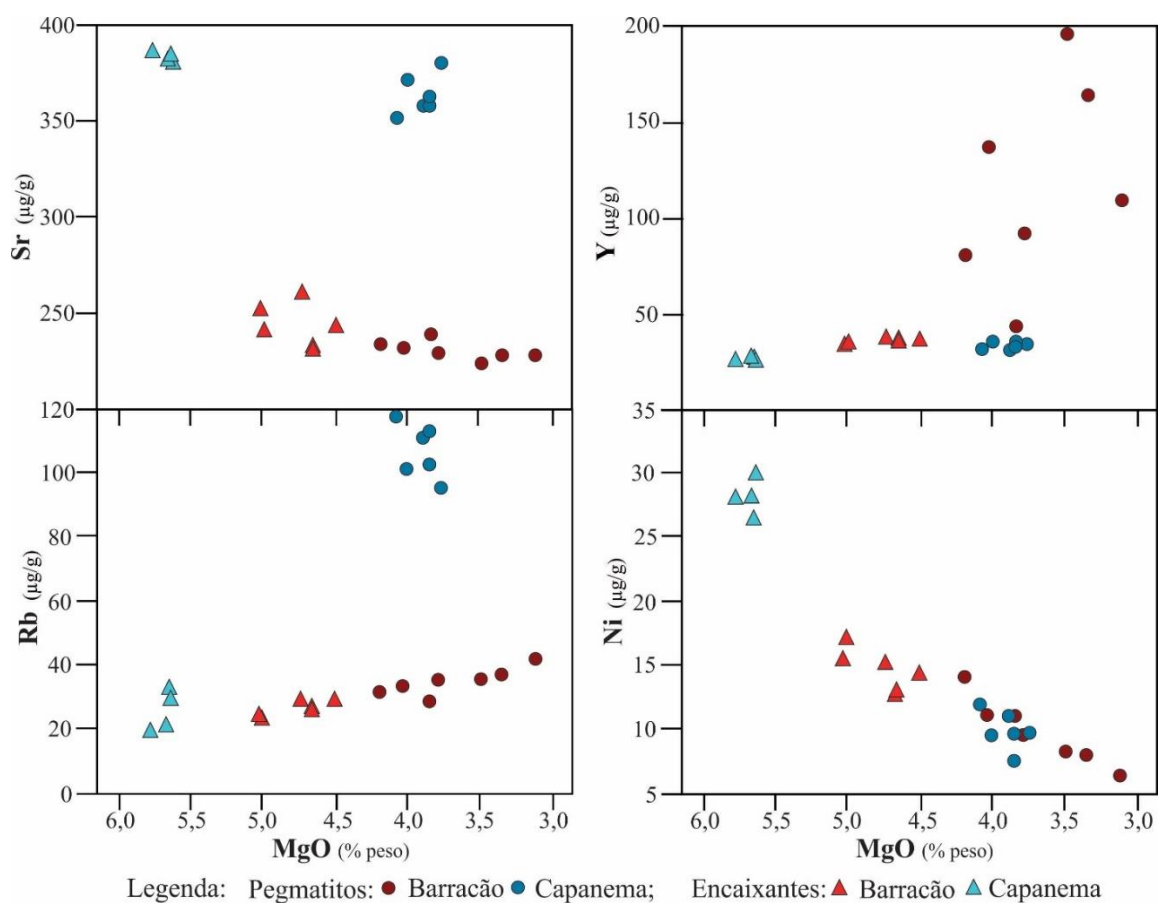


Figura 44 - Diagramas de variação do tipo Fenner para os elementos traço Sr, Rb, Y e Ni em  $\mu\text{g/g}$ , utilizando MgO (% peso) como óxido fracionante, para as rochas de Barracão e Capanema.

No diagrama multielementar normalizado pelo condrito de McDonough & Sun (1995) para os ETR, (Figura 45), observa-se que a assinatura geoquímica das rochas é de enriquecimento em ETR comparado ao condrito. As rochas de Capanema têm um padrão mais constante na distribuição dos ETR comparado com as encaixantes, e têm valores dos ETR leves (principalmente La, Ce e Pr) semelhantes aos de Barracão. A partir do Eu, com o início dos ETRP, os teores do Gd ao Lu de Barracão são distintivamente mais elevados nos pegmatitos com relação aos basaltos. A partir do Gd, a assinatura dos basaltos de Barracão assemelha-se à dos pegmatitos de Capanema e os teores dos pegmatitos de Barracão exibem valores de cerca de 2 a 4 vezes maiores do que os pegmatitos de Capanema. As rochas de Barracão têm razão  $(La/Lu)_N$  variando entre 1,9 a 2,6, com uma amostra apenas com razão de 3,7, nos pegmatitos e de 3,1 a 3,3 nos basaltos, mostrando enriquecimento em ETRP. Os pegmatitos de Capanema têm razão  $(La/Lu)_N$  de 4,5 a 4,7 e as encaixantes de 4,3 a 4,9.

Os altos valores de ETRP nos pegmatitos de Barracão devem estar concentrados na apatita visto o alto coeficiente de partição desses elementos para esses minerais segundo Rollinson (1993). Nota-se também que as rochas encaixantes das quais estes pegmatitos derivam têm uma abundância desses elementos, bem como na fonte, onde não deve ter havido fracionamento de granada.

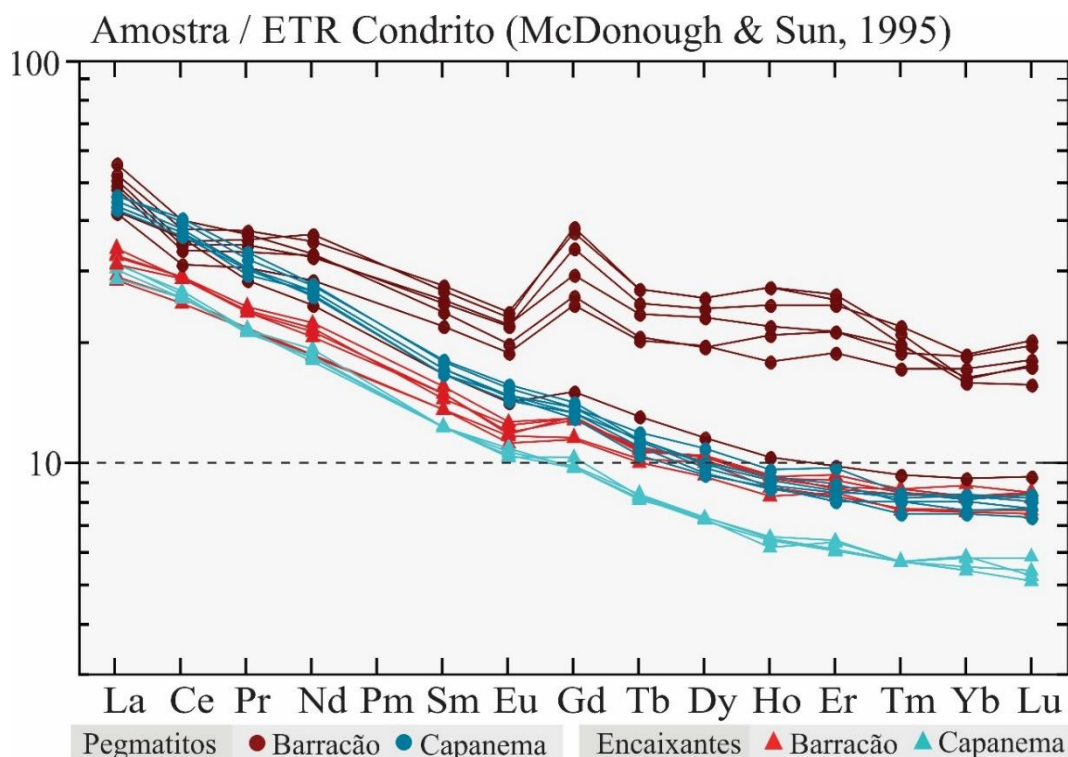


Figura 45 - Diagrama multielementar para ETR normalizadas pelo condrito de McDonough & Sun (1995) para os pegmatitos básicos e rochas encaixantes de Barracão e Capanema.

Foi empregado o cálculo do fator de enriquecimento para ETR e para o Y, dado pela razão entre sua concentração no líquido diferenciado ( $C_L$ ) e no magma inicial ( $C_0$ ), para quantificar o enriquecimento desses elementos incompatíveis no líquido. Nota-se que os fatores de enriquecimento entre o pegmatito e o basalto encaixante de Barracão apresentam aumento quase gradual dos ETRL aos ETRP e altos valores para o Y. Para Capanema, nota-se valores semelhantes para todos os ETR. Os resultados completos encontram-se no Apêndice 4.

#### 5.4 CLASSIFICAÇÃO DOS PEGMATITOS BÁSICOS E ENCAIXANTES SEGUNDO DIVISÕES DE PEATE (1989) E LICHT & LIMA (2014)

Na classificação dos magmas-tipo de Peate (1989), as rochas encaixantes de Barracão e Capanema são preferencialmente consideradas do tipo Paranapanema de acordo com o gráfico  $TiO_2$  x  $Fe_2O_3$  de Peate *et al.* (1992) (Figura 46).

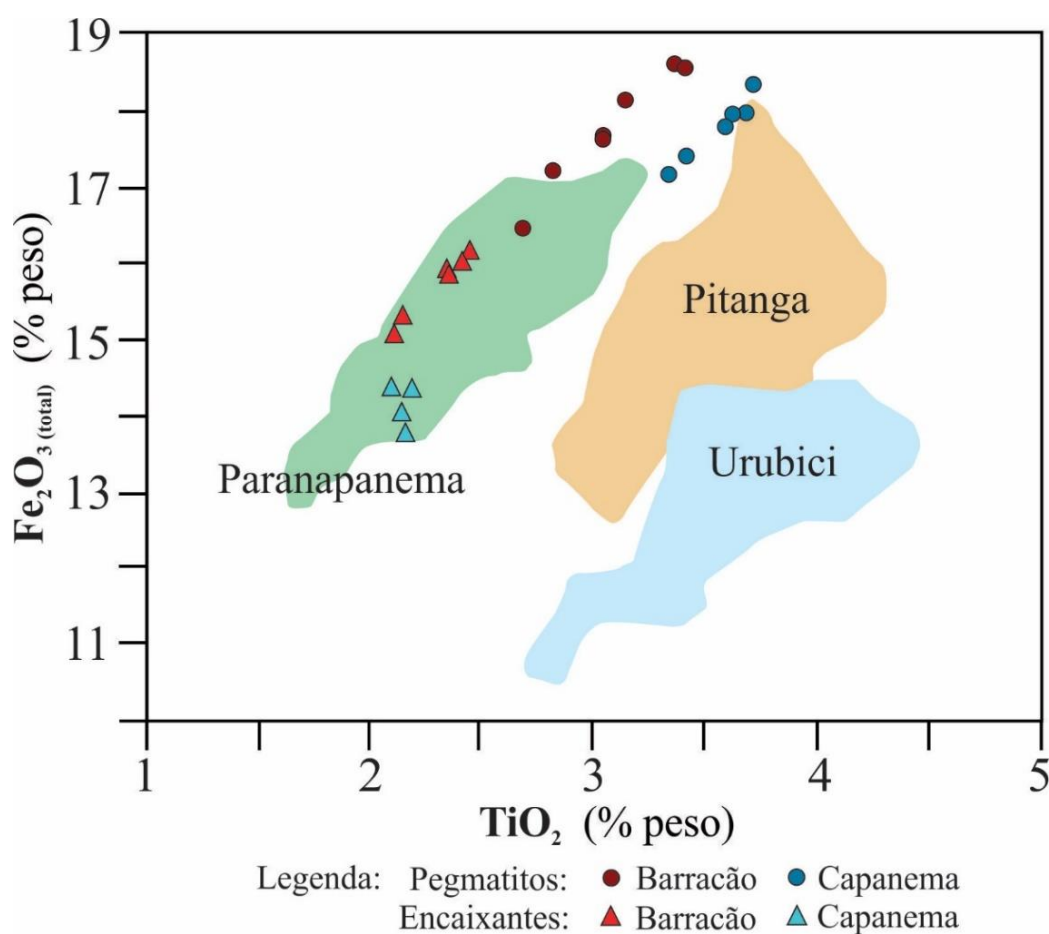


Figura 46 - Diagrama  $Fe_2O_3$  x  $TiO_2$  (Peate *et al.* 1992) para magmas de alto  $TiO_2$  e correlação com as rochas estudadas.



Os pegmatitos ficam fora das áreas definidas pela classificação, porém os autores colocam que apesar de as rochas do tipo Paranapanema tenderem a ter menos  $\text{TiO}_2$  do que as de Pitanga, há problemas de superposição, principalmente em rochas mais evoluídas, tornando difícil a distinção. Os teores de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , Sr, Zr e  $\text{Ti/Zr}$  corroboram com a classificação das rochas como do tipo Paranapanema.

No gráfico de  $\text{Zr/Y}$  x Sr as rochas de Barracão aproximam-se do campo de Paranapanema e as de Capanema do campo de Pitanga (Figura 47). Apesar de as rochas de Capanema aproximarem-se do campo de Pitanga devido aos altos valores de  $\text{Zr/Y}$ , valores inferiores a  $450 \mu\text{g/g}$  de Sr, segundo Peate *et al.* (1992), classificam essas rochas como Paranapanema. Altos valores de Y nos pegmatitos de Barracão dificultam a classificação no gráfico  $\text{Zr/Y}$  x Sr.

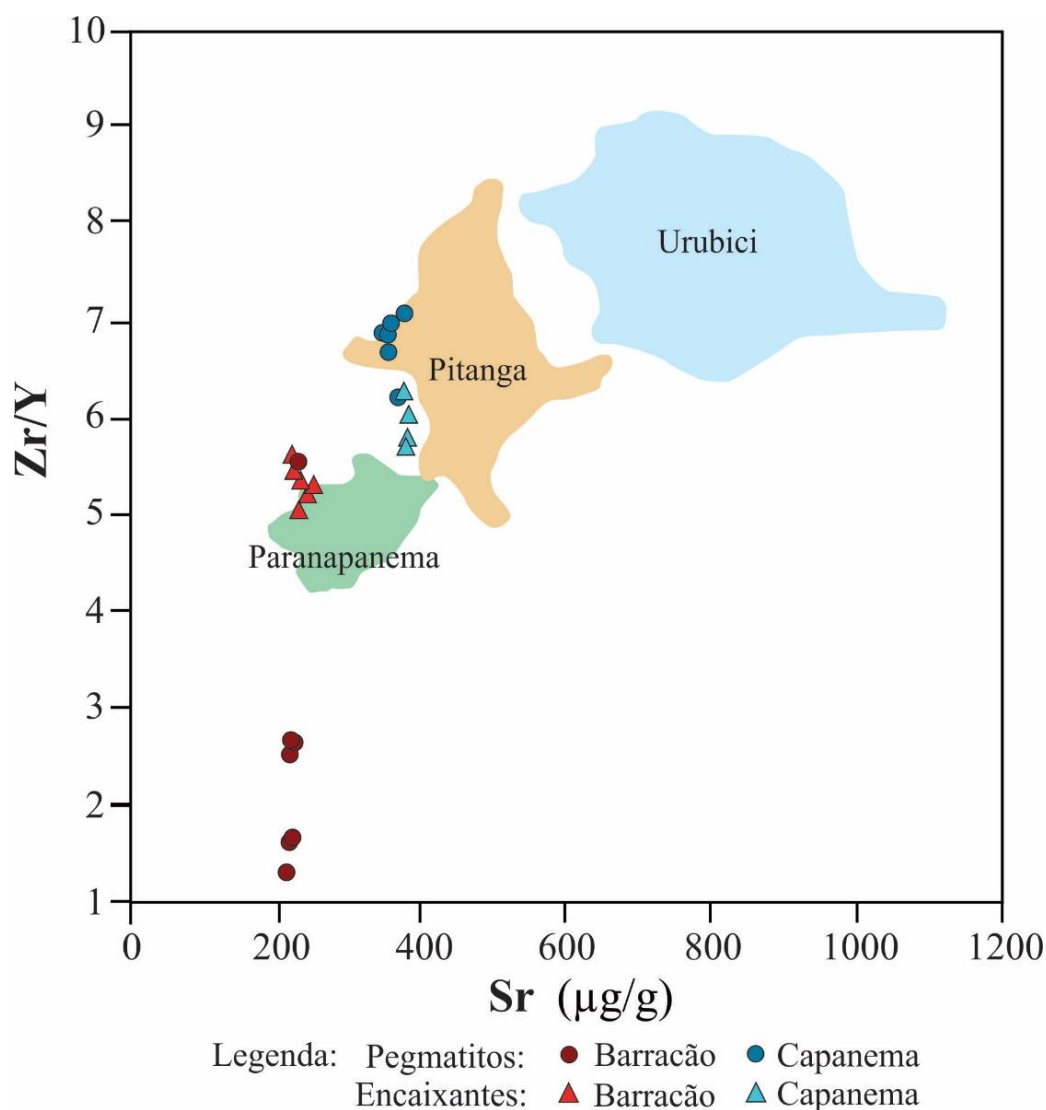


Figura 47 - Diagrama  $\text{Zr/Y}$  x Sr (Peate *et al.* 1992) para magmas de alto  $\text{TiO}_2$  e correlação com as rochas estudadas.

Na proposta de Licht & Lima (2014), as rochas estudadas subdividem-se em Tipo 1 - Sul e Norte, Tipo 3 e Tipo 4, conforme a

Tabela 7. Todas as rochas são de LSi e LZr, havendo variação para o Ti e o P, sendo que os pegmatitos têm valores mais altos desses elementos.

Nas classificações de Peate (1989) e Licht & Lima (2014), as rochas encaixantes são apropriadamente classificadas; os pegmatitos, refletindo teores de rochas mais diferenciadas, não são bem caracterizados.

Tabela 7 - Classificação dos pegmatitos básicos e encaixantes segundo os tipos de Licht & Lima (2014). Os valores usados como limites são: 62,02% SiO<sub>2</sub>; 522,15 µg/g Zr; 2,85% TiO<sub>2</sub>; 0,413% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. A divisão da Província Sul e Centro-Norte do Tipo 1 foi feita pela localização geográfica.

Amostra	Tipo	SiO <sub>2</sub>	Zr	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Classificação
BA-01	Basalto	51,31	191,5	2,49	0,30	Tipo 1 - Sul
BA-07	Basalto	51,32	190,9	2,47	0,29	Tipo 1 - Sul
BB-03	Basalto	51,12	167,0	2,17	0,25	Tipo 1 - Sul
BB-05	Basalto	51,34	166,8	2,21	0,26	Tipo 1 - Sul
CA-03	Basalto	50,72	153,2	2,22	0,26	Tipo 1 – Centro-Norte
CA-04	Basalto	50,76	145,0	2,18	0,25	Tipo 1 – Centro-Norte
CA-30	Basalto	50,10	147,0	2,25	0,25	Tipo 1 – Centro-Norte
CA-31	Basalto	50,21	145,2	2,16	0,26	Tipo 1 – Centro-Norte
PR-01	Basalto	51,36	190,9	2,38	0,28	Tipo 1 - Sul
PR 02	Basalto	51,53	185,7	2,40	0,28	Tipo 1 - Sul
BA-02	Pegmatito	50,73	206,2	2,88	0,32	Tipo 3
BA-03	Pegmatito	51,13	244,1	3,12	0,38	Tipo 3
BA-05	Pegmatito	50,94	239,0	3,11	0,37	Tipo 3
BA-06	Pegmatito	52,02	233,5	2,74	0,37	Tipo 1 - Sul
BA-08	Pegmatito	50,18	217,5	3,21	0,34	Tipo 3
BA 13	Pegmatito	51,48	267,9	3,43	0,41	Tipo 4
BA-16	Pegmatito	50,87	252,5	3,47	0,39	Tipo 3
CA 06	Pegmatito	49,53	214,2	3,78	0,37	Tipo 3
CA 19	Pegmatito	50,41	226,8	3,67	0,38	Tipo 3
CA-21	Pegmatito	49,79	218,5	3,75	0,37	Tipo 3
CA-23	Pegmatito	50,40	236,0	3,66	0,41	Tipo 4
CA-24	Pegmatito	51,07	240,1	3,40	0,41	Tipo 4
CA-27	Pegmatito	50,53	212,8	3,47	0,37	Tipo 3

**Legenda:**

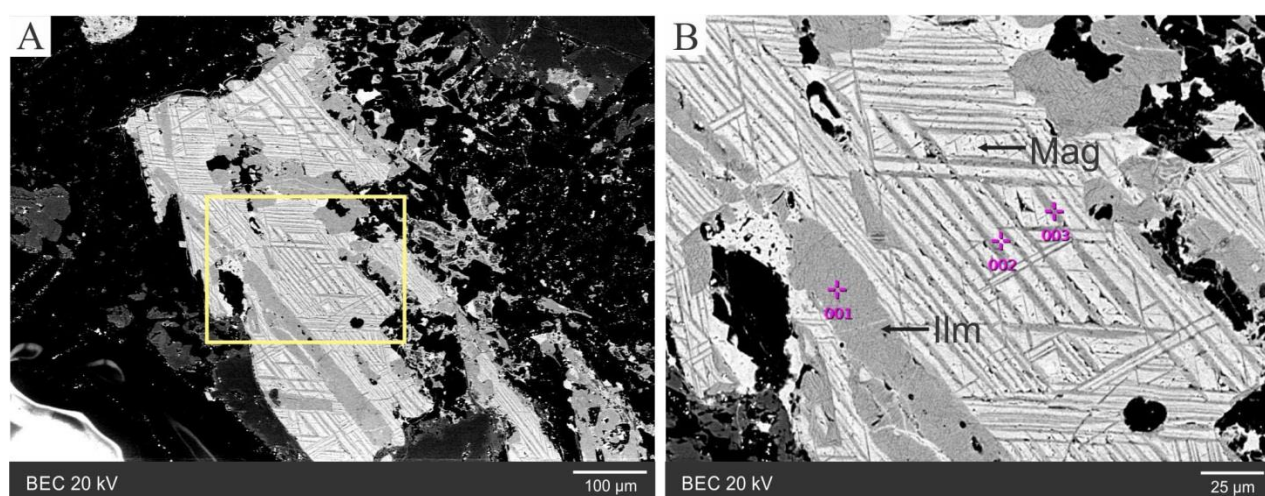
Abaixo do limite

Acima do limite



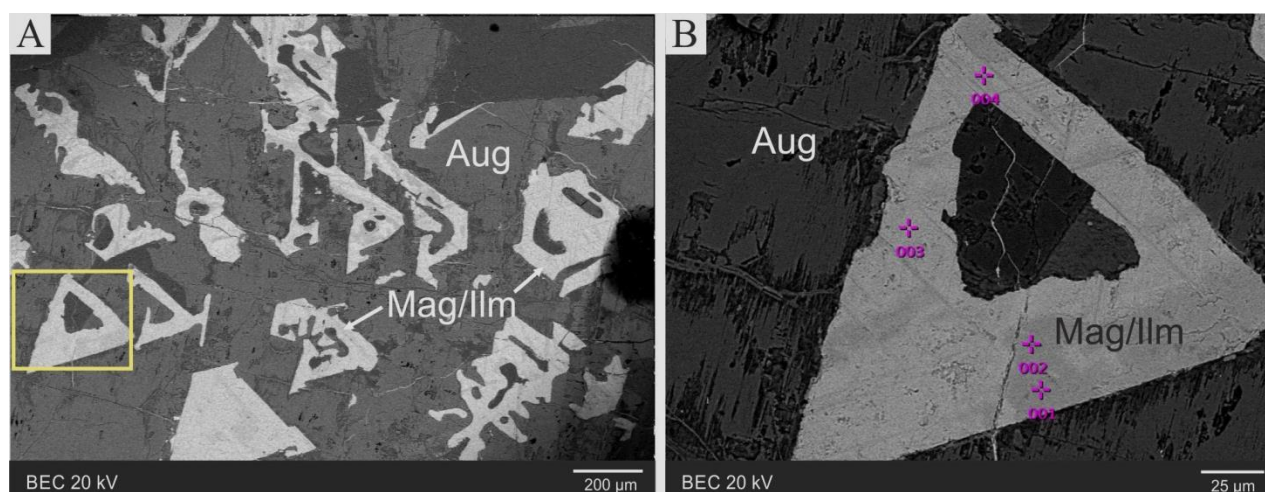
## 5.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) ASSOCIADA À ESPECTROSCOPIA POR DISPERSÃO DE ENERGIA (EDS)

Por meio do MEV com EDS acoplado foi possível observar cristais de minerais opacos com intercrescimento entre magnetita e ilmenita, como foi também observado por Walker (1953) em luz refletida em seções polidas, representadas respectivamente por níveis mais claros e níveis mais escuros de cinza. Os níveis de magnetita são mais claros devido a maior densidade do mineral (Figura 48 em cristal esqueletal amorfo; Figura 49 em cristais esqueletais triangular em seção). Os dados químicos obtidos por EDS estão representados na Tabela da Figura 48.



	TiO <sub>2</sub>	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
001	54,21	45,79	-
002	10,14	89,14	0,72
003	31,80	68,20	-

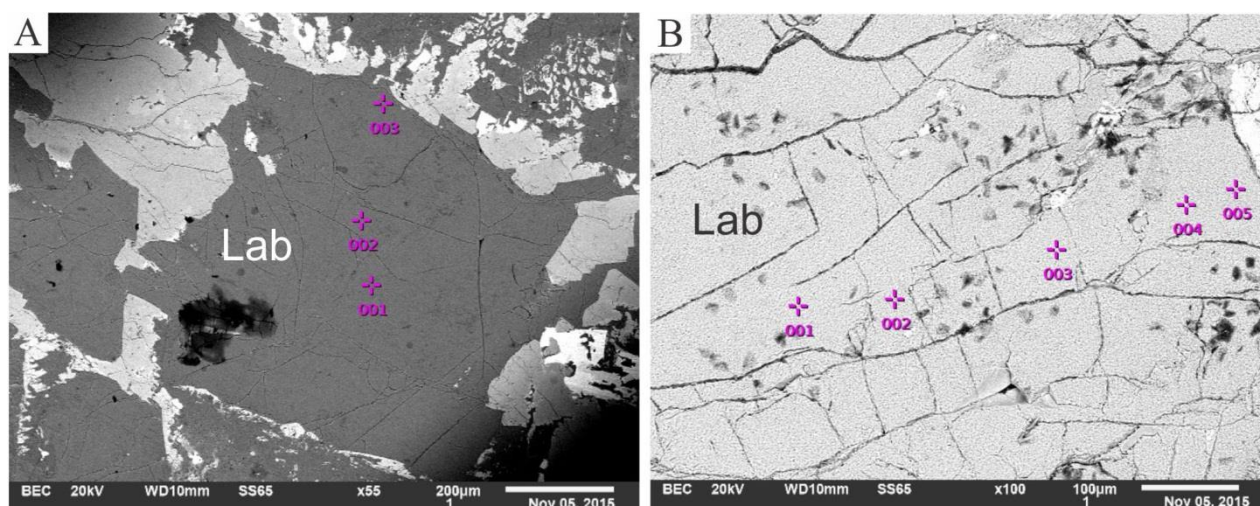
Figura 48 - Intercrescimento entre Magnetita (Mag) e Ilmenita (Ilm) em pegmatito de Capanema. A – Demarcação do mineral analisado; B – Detalhe com as feições de intercrescimento e pontos de obtenção dos dados por EDS. A Tabela indica a porcentagem composicional dos óxidos nos pontos analisados. Imagens em MEV - ERE.



	TiO <sub>2</sub>	MnO	FeO
<b>001</b>	49,27	1,29	49,44
<b>002</b>	57,74	1,58	40,68
<b>003</b>	22,65	0,88	76,47
<b>004</b>	18,27	2,84	78,89

Figura 49 - Hábito dos minerais opacos (Mag/Ilm) em um cristal de augita em pegmatito de Capanema. A - Demarcação do mineral analisado; B - Detalhe com tonalidades cinzas mais claras e mais escuras evidenciando o intercrescimento entre magnetita e ilmenita e pontos de obtenção dos dados geoquímicos. A Tabela indica a porcentagem composicional dos óxidos nos pontos analisados. Imagens em MEV - ERE.

Walker (1953) e Hartley & Thordarson (2009) constataram que nos pegmatitos o plagioclásio tem teores menores de CaO e MgO quando comparados às rochas encaixantes, sendo enriquecido em Na<sub>2</sub>O, indicando cristalização tardia e parentesco mais evoluído. Ao buscar aplicar nas rochas de Capanema e Barracão, não se encontrou essas razões de forma clara (Figura 50).



A	CaO	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
<b>001</b>	21,98	7,17	21,41	49,44
<b>002</b>	22,83	7,68	19,99	49,51
<b>003</b>	19,95	7,74	20,96	51,36
B	CaO	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
<b>001</b>	22,21	7,14	22,28	48,37
<b>002</b>	22,84	7,75	22,14	47,26
<b>003</b>	21,43	6,69	22,00	49,88
<b>004</b>	21,08	6,94	21,05	50,92
<b>005</b>	18,94	7,65	20,24	53,17

Figura 50 – Cristais de labradorita. A – Localização dos pontos analisados da Tabela A; B – Localização dos pontos de amostragem da Tabela B. As Tabelas indicam a porcentagem composicional dos óxidos nos pontos analisados. Imagens em MEV - ERE.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

No sudoeste do Paraná, nos municípios de Barracão e Capanema, ocorrem pegmatitos básicos nos derrames espessos gerados pelo processo de inflação, pertencentes à Província Magmática do Paraná. Os estudos realizados nos pegmatitos e encaixantes quanto à origem, geoquímica e petrologia possibilitam as seguintes conclusões:

### 6.1 PETROLÓGICAS

I) as assembleias minerais dos basaltos e dos pegmatitos são muito semelhantes, constituídas essencialmente por labradorita, augita e minerais opacos (geralmente magnetita e ilmenita), ocorrendo celadonita nos pegmatitos de Capanema (Tabela 8);

II) a granulação é o principal critério para distinguir os pegmatitos, mais grossos, das encaixantes, mais finas;

III) o processo de formação dos pegmatitos por cristalização rápida de líquidos segregados em condições de menor viscosidade e alta difusão são suportados por cristais de labradorita com terminações em cauda de andorinha, agregados de labradorita compondo a matriz da rocha e formando esferulitos, intercrescimento simplectítico entre labradorita e a augita, agregados de augita em leque, cristais com hábito esquelético e presença de vidro;

IV) a granulação dos pegmatitos de Capanema é maior, variando em média de 0,5 a 1,0 cm e 0,2 a 0,5 cm em Barracão;

V) os basaltos de Capanema são mais finos, variando de 0,1 a 0,25 mm, com fenocristais de até 1,4 mm, e os de Barracão 0,2 a 0,4 mm, com fenocristais de até 1,2 mm;

VI) há maior contraste de granulação, quando se compara pegmatitos e basaltos, uma vez que os pegmatitos de Capanema são cerca de dez a vinte vezes maiores do que as encaixantes, e os de Barracão cerca de cinco a dez vezes maiores;

VII) há tendências a cores castanha, cinza e cinza esverdeada nos basaltos e pegmatitos de Capanema em comparação com os basaltos cinza e castanho avermelhados de Barracão.

Tabela 8 - Comparação entre os basaltos e pegmatitos de Capanema e Barracão.

	<b>Basalto Barracão</b>	<b>Pegmatito Barracão</b>	<b>Basalto Capanema</b>	<b>Pegmatito Capanema</b>
<b>Assembleia Mineral</b>	Sem celadonita			Com celadonita.
<b>Granulação</b>	0,2 a 0,4 mm fenocristais até 1,2 mm	0,2 a 0,5 cm	0,1 a 0,25 mm, fenocristais até 1,4 mm	0,5 a 1,0 cm
<b>Granulação pegmatito versus basalto</b>	Pegmatito cerca de cinco a dez vezes maiores do que as encaixantes		Pegmatito cerca de dez a vinte vezes maiores do que as encaixantes	
<b>Cor</b>	castanha, cinza e cinza esverdeada		cinza e castanha avermelhada	

## 6.2 GEOQUÍMICAS

I) no diagrama TAS, de Le Maitre *et al.* (1989), as amostras classificam-se como basaltos, exceto as amostras dos pegmatitos básicos de Capanema, que se concentram no campo dos traquibasaltos;

II) no diagrama catiônico de Jensen (1976), todas as rochas analisadas agrupam-se no campo dos basaltos toleíticos de alto ferro;

III) no diagrama AFM com a divisão de Irvine & Baragar (1971), as rochas estudadas concentram-se no campo da série toleítica;

IV) no diagrama milicatiônico  $R_1R_2$  de De La Roche *et al.* (1980) as rochas dividem-se em quatro campos, onde as encaixantes de Capanema concentram-se no campo dos basaltos e as rochas encaixantes de Barracão concentram-se no campo dos andesi-basaltos. Os pegmatitos de Capanema situam-se no campo dos latitos e os pegmatitos de Barracão dividem-se entre os campos dos latiandesitos e andesi-basaltos;

V) no diagrama do tipo Fenner, observa-se enriquecimento em  $TiO_2$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $P_2O_5$  e  $Fe_2O_{3total}$  e empobrecimento em  $MgO$ ,  $Al_2O_3$  e  $CaO$  nos pegmatitos, com relação aos basaltos, sendo os pegmatitos de Capanema diferenciados em dois conjuntos bem definidos, enquanto aqueles de Barracão têm uma tendência a serem mais semelhantes aos basaltos;

VI) os pegmatitos são mais enriquecidos em elementos traço incompatíveis do que as encaixantes, exceto pelos teores de Sr;

VII) os pegmatitos de Barracão têm anomalias positivas em Y e ETRP e os de Capanema, anomalias positivas em K, Rb e LILE;

VIII) no diagrama multielementar para os elementos traço, normalizado pelo manto primordial de Wood *et al.* (1979), os pegmatitos de Capanema têm menor dispersão, diferenciam-se das encaixantes de maneira distinta, têm anomalias menos distintas e os elementos traço fracionaram-se com razões mais constantes com relação à encaixante. Os pegmatitos de Barracão têm maior dispersão e diferenciam-se de maneira mais gradativa das encaixantes;

IX) no diagrama multielementar de McDonough & Sun (1995) normalizado pelo condrito, as rochas de Barracão têm aumento dos ETRP em relação à rocha encaixante, principalmente a partir do Eu, e os pegmatitos de Capanema têm razões de enriquecimento constantes para todos os ETR.

### 6.3 INTEGRAÇÃO E PROPOSTAS DE MODELOS DE FORMAÇÃO

Quanto à diferença de granulação entre os pegmatitos e basaltos, Walker (1953) sugere que rochas mais finas tendem a ter pegmatitos mais grossos, possivelmente porque ocorre falha na segregação dos constituintes voláteis e minerais tardios, gerando um aumento generalizado ao invés de aumento localizado no tamanho dos cristais. Em relação à celadonita de Capanema, acredita-se que pode ter sido uma fase secundária hidrotermal que ocupou as porções pegmatíticas que ainda se encontravam em formação, devido a menor pressão, semelhante ao relatado por Puffer & Volkert (2001).

A análise dos óxidos mostra que os pegmatitos básicos se diferenciam dos basaltos por serem rochas mais evoluídas, com enriquecimento em  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{total}}$  e empobrecimento em  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaO}$ , corroborando com os trabalhos de Greenough & Dostal (1992), Puffer & Horter (1993), Goff (1996), Hartley & Thordarson (2009) e os trabalhos de Ferreira (2011) e Silva (2011) em pegmatitos da PMP, no sudoeste do Paraná.

Nos diagramas geoquímicos nota-se que, devido aos altos valores de  $\text{K}_2\text{O}$ , principalmente pela presença da celadonita, os valores dos pegmatitos de Capanema são deslocados.

A análise dos elementos traço permite definir que pegmatitos são mais enriquecidos quando comparados com as suas encaixantes, exceto pelos teores de Sr. Os teores de Sr são empregados para separar as rochas das duas ocorrências. Os teores de K, Rb, Y e ETRP são empregados para separar os pegmatitos das duas ocorrências.



Sugere-se que, tanto em termos petrográficos, quanto geoquímicos, os pegmatitos básicos de Capanema são mais diferenciados das suas encaixantes do que os pegmatitos básicos de Barracão. Os modelos de formação dos pegmatitos são inúmeros, podendo atuar associados, porém concordam no que diz respeito à sua formação tardia, quando a inflação do derrame já cessou ou está próximo de cessar, e que essas rochas são mais evoluídas do que as encaixantes. Citam-se: Santin (1969), com a formação por intrusão de um magma mais alcalino enriquecido em voláteis, influência de líquidos hidrotermais e/ou substituição metassomática; Greenough & Dostal (1992), sugerindo a formação por drenagem de líquidos para juntas; Goff (1996), que propõe a formação de instabilidade de densidade, acarretando em zonas de menor pressão e migração de fluidos da porção central do derrame para essas zonas; Philpotts *et al.* (1996), com formação de uma rede cristalina interconectada que compacta-se associada à migração de fluidos; Puffer & Horter (1993), que propõem a formação de diápiros até a interface com a crosta superior e a perda de voláteis por fraturamento e Hartley & Thordarson (2009), que propõem o modelo de cristalização fracionada de um horizonte de material fundido na parte superior da porção basal do derrame e ascensão desse material segregado.

A hipótese proposta por Puffer & Horter (1993), usando três fatores para explicar a formação dos cristais grandes, parece ser apropriada aos pegmatitos básicos estudados: tempo de residência diferenciado das hospedeiras; diminuição da densidade de nucleação devido à fusão dos núcleos cristalinos resultante das altas temperaturas no núcleo do derrame e dificuldade de uma renucleação; e aceleração da taxa de difusão e diminuição da viscosidade, facilitada por um sutil aumento de voláteis. Porém, a diminuição da densidade de nucleação pode ser simplificada pela natural ausência de núcleos cristalinos, uma vez que não se encontram vestígios da fusão de núcleos pré-existentes. Os cristais menores e o vidro devem ser resultantes da despressurização súbita gerada pelas fraturas posteriores.



## 7 REFERÊNCIAS

ANDERSON, D.L. Scoring hotspots: The plume and plate paradigms. **Geological Society of America Special Paper**, v. 388, p. 31-54, 2005.

ANDERSON, A.T.; SWIHART, G.H.; ARTIOLI, G.; GEIGER, C.A. Segregation vesicles. gas filter-pressing, and igneous differentiation. **The Journal of Geology**, v. 92, p. 55-72, 1984.

ARIOLI, E.E. **Arquitetura faciológica da sequência vulcânica e o significado exploratório das anomalias geoquímicas de Elementos do Grupo da Platina (EGP) e metais associados no Sistema Magmático Serra Geral, Estado do Paraná, Brasil**. 194 p. Tese (Doutorado em Geologia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

ARIOLI, E.E.; LICHT, O.A.B. **O Grupo Serra Geral no Estado do Paraná**. Curitiba: Serviço Geológico do Paraná (MINEROPAR), 2013. 2v. 451 p. Relatório Técnico.

BELLIENI, G.; COMIN-CHIARAMONTI, P.; MARQUES, L.S.; MELFI, A.J.; PICCIRILLO, E.M.; NARDY, A.J.R.; ROISENBERG, A. High- and low-TiO<sub>2</sub> flood basalts from the Paraná plateau (Brazil): petrology and geochemical aspects bearing on their mantle origin. **Neues Jahrbuch für Mineralogie – Abhandlungen**, Stuttgart, v. 150, p. 272-306, 1984.

BIZZI, L.A.; VIDOTTI, R.M. Condicionamento do magmatismo pós-Gondwana. In: BIZZI, L.A.; SCHOBENHAUS, C.; S.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES J.H. (EDS.) **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil**. Brasília: Serviço Geológico do Brasil (CPRM), 2003. p. 335-361.

BOSETTI, E.P.; PEYERL, D.; HORODYSKI, R. S. E ZABINI, C. FORMAÇÃO Ponta Grossa: História, Fácies e Fósseis. In: I SIMPÓSIO DE PESQUISA EM ENSINO E HISTÓRIA DE CIÊNCIAS DA TERRA E III SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE ENSINO E GEOLOGIA NO BRASIL, 2007, Campinas. **Anais**, Campinas: Unicamp, 2007. p. 353-360.

BRYAN, S.; ERNST, R. Revised definition of large igneous provinces (LIPs). **Earth Science Reviews**, v. 86, p. 175–202, 2008.

CAROFF, M.; MAURY, R.C.; COTTEN, J.; CLÉMENT, J.P. Segregation structures in vapor differentiated basaltic flows. **Bulletin of Volcanology**, v. 62, n. 3, p. 171–187, 2000.

COFFIN, M.F.; DUNCAN, R.A.; ELDHOLM, O.; FITTON, J.G.; FREY, F.A.; LARSEN, H.C.; MAHONEY, J.J.; SAUNDERS, A.D.; SCHLICH, R.; WALLACE, P.J. Large igneous provinces and scientific ocean drilling: status quo and a look ahead. **Oceanography**, v. 19, n. 4, p. 150-160, 2006.

COFFIN, M.F.; ELDHOLM, O. Large igneous provinces. In: SELLEY, R.C., COCKS, R., PLIMER I.R. (Eds) **Encyclopedia of Geology**. Oxford: Elsevier, 2005, p. 315-323.

COFFIN, M.F.; ELDHOLM, O. Large igneous provinces: crustal structure, dimensions, and external consequences. **Reviews of Geophysics**, v. 32, p. 1-36, 1994.

DE LA ROCHE, H.; LETERRIER, J.; GRANDCLAUDE, P.; MARCHAL, M. A classification of volcanic and plutonic rocks using  $R_1R_2$ -diagram and major element analyses - Its relationships with current nomenclature. **Chemical Geology**, v. 29, p. 183-210, 1980.

DUNHAM, K.C. Crystal cavities in lavas from the Hawaiian Islands. **American Mineralogist**, v. 18, n. 9, p. 369-385, 1933.

ERNESTO, M.; MARQUES, L.S.; PICCIRILLO, E.M.; MOLINA, E.C., USSAMI, N., COMIN-CHIARAMONTI, P.; BELLINI, G. Paraná Magmatic Province–Tristan da Cunha plume system: fixed versus mobile plume, petrogenetic considerations and alternative heat sources. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 118, p. 15-36, 2002.

FERREIRA, C.H.N. **Geologia do derrame Salto do Lontra e gênese dos pegmatitos básicos associados, Província Magmática do Paraná, sudoeste do Estado do Paraná**. 102 f. Dissertação de Mestrado– Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

FERREIRA, F.J.F. Alinhamentos estruturais-magnéticos da região centro-oriental da Bacia do Paraná e seu significado tectônico. In: YOSHIDA R E GAMA JR. (eds.). **Geologia da Bacia do Paraná – Reavaliação da Potencialidade e Prospectividade em Hidrocarbonetos**. São Paulo: Consórcio CESP-IPT, 1982. p. 144-166.

GOFF, F. Vesicle cylinders in vapor-differentiated basalt flows. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 71, n. 2–4, p. 167–185, 1996.

GOOGLE. **Google Earth**. Version 7.1.5.1557. 2015. Disponível em: <<http://www.google.com.br/intl/pt-PT/earth/>>. Acesso em: 25 de abril de 2015.

GREENOUGH, J.D.; DOSTAL, J. Cooling history and differentiation of a thick North Mountain basalt flow. **Bulletin of Volcanology**, v. 55, p. 63–73, 1992.

GREENOUGH, J.D.; LEE, C.Y.; FRYER, J. Evidence for volatile-influenced differentiation in a layered alkali basalt flow, Penghu Islands, Taiwan, **Bulletin of Volcanology**, v.60, p. 412 – 424, 1999.

HARTLEY, M.E.; THORDARSON, T. Melt segregations in a Columbia River Basalt lava flow: A possible mechanism for the formation of highly evolved mafic. **Lithos**, v.112, n. 3-4, p. 434–446, 2009.

HELZ, R.T.; KIRSCHENBAUM, H; MAINENKO, J.W. Diapiric transfer of melt in Kilanea Iki lava lake, Hawaii: a quick, efficient process of igneous differentiation. **Geological Society of America Bulletin**, v. 101, p. 578-594, 1989.

INNOCENT, C.; PARRON, C.; HAMELIN, B. Rb/Sr chronology and crystal chemistry of celadonites from the Paraná continental tholeiites, Brazil. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 61, p. 3753–3761, 1997.

IRVINE, T.N.; BARAGAR, W.R.A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. **Canadian Journal of Earth Sciences**, v. 8, p. 523-548, 1971.

JEFFERSON, C.W.; HULBERT, L.J.; RAINBIRD, R.H.; HALL, G.E.M.; GRÉGOIRE, D.C.; GRINENKO, L.I. Mineral Resource Assessment of the Neoproterozoic Franklin Igneous Events of Arctic Canada: Comparison with the Permo-Triassic Noril'sk-Talnakh Ni-Cu-Pge Deposits of Russia. **Geological Survey of Canada**, Open File 2789, 48 p., 1994.

JENSEN, L.S. A new cation plot for classifying subalkaline volcanic rocks. **Ontario Division of Mines**, Miscellaneous Paper, v. 66, 22 p., 1976.

KONTAK, D.J.; DE WOLFE DE YOUNG, M.Y.; DOSTAL, J. Late-Stage Crystallization History of the Jurassic North Mountain Basalt, Nova Scotia, Canadá. I. Textural and Chemical Evidence for Pervasive Development of Silicate-Liquid Immiscibility. **The Canadian Mineralogist**, v. 40, n. 5, p. 1287-1311, 2002.

LACROIX, A. Les pegmatitoides des roches volcaniques a facies basaltiques: a propos de celles du Wei-Tchang. **Bulletin of the Geological Society of China**, v. 8, p. 45-49, 1929.

LE MAITRE, R.W.; BATEMAN, P.; DUBEK, A.; KELLER, J.; LAMEYRE, J.; LE BAS, M.J.; SABINE, P.A.; SCHMID, R.; SORENSEN, H.; STRECKEISEN, A.; WOOLLEY, A.R.; ZANETTIN, B. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Oxford: **Blackwell Scientific Publications**, 193 p., 1989.

LFNATEC. **Publicação Técnica do Laboratório de Física Nuclear Aplicada**, Londrina: LFNA – UEL, março / 2004. v. 8, n. 1, 19 p. Disponível em: <http://www.uel.br/grupos/gfna/fluorescencia.pdf>. Acessado em 25 de abril de 2015.

LICHT, O.A.B.; LIMA, E.F. de. A Associação dos gaps de Si-Zr-Ti-P na subdivisão das rochas da Província Ígnea do Paraná. In: 47º Congresso Brasileiro de Geologia, 2014, Salvador. **Anais**. Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia (SBG), 2014. CD-ROM.

LUSTRINO, M. How the delamination and detachment of lower crust can influence basaltic magmatism. **Earth Science Reviews**, v. 72, p. 21-38, 2005.

MACDONALD, G.A. Pahoehoe, aa and block lava. **American Journal of Science**. v. 251, p. 169 – 191, 1953.

MACHADO, F.B.; NARDY, A.J.R.; OLIVEIRA, M.A.F. Geologia e aspectos petrológicos das rochas intrusivas e efusivas mesozóicas de parte da borda leste da Bacia do Paraná no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, n. 1, p. 64-80, 2007.

MANTOVANI, M.S.M.; MARQUES, L.S.; SOUSA, M.A.; ATALLA, L.; CIVETTA, L.; INNOCENTI, F. Trace Element and Strontium Isotope Constraints of the Origin and Evolution of Paraná Continental Flood Basalts of Santa Catarina State (Southern Brazil). **Journal of Petrology**, v. 26, p. 187-209, 1985.

MARQUES, L.S. Tectônica de placas, plumas, heterogeneidades do manto e a origem da Província Magmática do Paraná. In IV Simpósio de Vulcanismo e Ambientes Associados, 2008, Foz do Iguaçu. **Anais**. Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Geologia (SBG), 2008. CD-ROM.

MARQUES, L.S.; ERNESTO, M. O magmatismo Toleítico da Bacia do Paraná. In: MANTESSO NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; NEVES, B.B.B. (Eds.). **Geologia do continente sul-americano - evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca Produções Culturais, 2004. p. 245-263.

MARSH, B.D. Igneous processes in sills. In: Pacific Rim Congress 90, 1990, Victoria (Australia). **Anais**. Victoria: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, v. 2, p. 83-91.

MCDONOUGH W.F.; SUN S. The composition of the Earth. **Chemical Geology**, v. 120, p. 223–253, 1995.

MELFI, A.; PICCIRILLO, E.M.; NARDY, A.J.R. Geological and Magmatic Aspects of the Paraná Basin – An Introduction. In: PICCIRILLO, E. M.; MELFI, A. J. **The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin – petrogenetic and geophysical aspects**. São Paulo: USP, p. 2-13, 1988.

MIDDLEMOST, E.A.K. Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. **Chemical Geology**, v. 77, p. 19-26, 1989.

MILANI, E.J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental**. 225 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

MILANI, E.J., FRANÇA, A.B., SCHNEIDER, R.L. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 8, n. 1, p. 69-82, 1994.

MILANI E.J.; MELO, J.H.G.; SOUZA, P.A.; FERNANDES, L.A.; FRANÇA, A.B. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, n. 2, p. 265-287, 2007.

MINCATO, R.L. **Metagenia dos elementos do grupo da platina com base na estratigrafia e geoquímica da Província Ígnea Continental do Paraná**. 172 p. Tese (Doutorado em Geologia). Instituto de Geociências, Universidade de Campinas, Campinas, 2000.

O'CONNOR, J.M.; DUNCAN, R.A. Evolution of the Walvis Ridge – Rio Grande Rise hotspot system: implications for African and South American plate motions over plumes. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. B11, p. 17474-17502, 1990.

ORLANDI FILHO, V.; KREBS, A. S. J.; GIFFONI, L. E. Coluna White, Serra do Rio do Rastro, SC - Seção Geológica Clássica do Continente Gondwana no Brasil. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; QUEIROZ, E.T.; WINGE, M.; BERBERT-BORN, M.L.C. (Edit.). **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. Brasília: DNPM/CPRM - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP), 2002, 554 p.

PEATE, D.W. **Stratigraphy and petrogenesis of the Paraná Continental Flood Basalts, Southern Brazil**. PhD thesis, Open University. 359 p., 1989.

PEATE, D.W.; HAWKESWORTH, C.J.; MANTOVANI, M.S.M. Chemical Stratigraphy of the Paraná Lavas (South America): Classification of Magma Types and their Spatial Distribution. **Bulletin of Volcanology**, v. 55, p. 119-139, 1992.

PERKINELMER. **The 30-Minute Guide to ICP-MS**. Waltham: PerkinElmer, 2011. Versão internet, 8 p. Disponível em: [http://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/44-74849tch\\_icpmsthirtyminuteguide.pdf](http://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/44-74849tch_icpmsthirtyminuteguide.pdf). Acesso em 01 de maio de 2015. Nota técnica.

PHILPOTTS, A.R.; CARROLL, M.; HILL, J.M. Crystal-Mush Compaction and the Origin of Pegmatitic Segregation Sheets in a Thick Flood-Basalt Flow in the Mesozoic Hartford Basin, Connecticut. **Journal of Petrology**, v. 37, n. 4, p. 811-836, 1996.

PICCIRILLO, E. M.; COMIN-CHIARAMONTI, P.; MELFI, A.; STOLFA, D.; BELLINI, G.; MARQUES, L. S.; GIARETTA, A.; NARDY, A. J. R.; PINESE, J. P. P.; RAPOSO, M. I. B.; ROISEMBERG, A. Petrochemistry of continental flood basalts – rhyolite suites and related intrusives from the Paraná Basin (Brazil). In: PICCIRILLO, E. M.; MELFI, A. J. **The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin – petrogenetic and geophysical aspects**. São Paulo: USP, p.107-156, 1988.

PUFFER, J.H.; HORTER, D.L. Origin of pegmatitic segregation veins within flood basalts. **Geological Society of America Bulletin**, v. 105, n. 6, p. 738–748, 1993.

PUFFER, J.H.; VOLKERT, R.A. Pegmatoid and gabbroid layers in Jurassic Preakness and Hook Mountain Basalts, Newark Basin, New Jersey. **The Journal of Geology**, v. 109, p. 585-601, 2001.

ROCHA-JÚNIOR, E.R.V.; MARQUES, L.S.; BABINSKI, M.; NARDY, A.J.R.; FIGUEIREDO, A.M.G.; MACHADO, F.B. Sr-Nd-Pb isotopic constraints on the nature of the mantle sources involved in the genesis of the high-Ti tholeiites from Northern Paraná Continental Flood Basalts (Brazil). **Journal of South American Earth Sciences**, v. 46, p. 9-25, 2013.

ROLLINSON, H. **Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation**. London: Longman, 352 p, 1993.

SANTIN, S.F. Pegmatitoides in the horizontal basalts of the Lanzarote and Fuerteventura Islands, Series I, **Bulletin Volcanologique**, v. 33, p. 989-1007, 1969.

SELF, S.; KESZTHELYI, L.; THORDARSON, T. The importance of pahoehoe. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 26, p. 81-110, 1998.

SELF, S.; THORDARSON T.; KESZTHELYI, L. Emplacement of continental flood basalt lava flows, Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism. **Geophysical Monograph**, v. 100, p. 381–410, 1997.

SILVA, K.F.B. **Caracterização petrográfica e geoquímica de pegmatíticos básicos, encaixados em derrames basálticos do Grupo Serra Geral, no Estado do Paraná**. 93 p. Trabalhos de Conclusão de Curso, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

THIEDE, D.S.; VASCONCELOS, P.M. 2010. Paraná Flood Basalts: Rapid Extrusion Hypothesis Supported by New  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Results. **Geology**, v. 38, n. 8, p. 747-450, 2010.

TURNER, S.; C. HAWKESWORTH; K. GALLAGHER; K. STEWART; D. PEATE; M. MANTOVANI. Mantle plumes, flood basalts, and thermal models for melt generation beneath continents: Assessment of a conductive heating model and application to the Paraná, **Journal of Geophysical Research**, v. 101(B5) p. 11503–11518, 1996.

VASCONCELLOS, E. M. G.; LICHT, O. A. B.; BRAGA, L. S.; BITTENCOURT, A. V. L. Gabros da Bacia do Paraná: aspectos petrográficos e geoquímicos. In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA; I SIMPÓSIO DE GEOQUÍMICA DOS PAÍSES DO MERCOSUL, 2001, Curitiba. **Anais**, Curitiba: Sociedade Brasileira de Geoquímica. 2001. WALKER, F. The pegmatitic differentiates of basic sheets. **American Journal of Science**, v. 251, n. 1, p. 41–60, 1953.

WHITE, I. C. **Relatório final da Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), 1988. Parte I, p. 1-300; Parte II, p. 301-617. (Ed. Fac-similar), 1908.

WHITNEY, D. L.; EVANS, B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals. **American Mineralogist**, v. 95, p. 185-187, 2010.

WOOD, D.A.; TARNEY, J.; VARET, J.; SAUNDERS, A.D.; BOUGAULT, H.; JORON, J.L.; TREUIL, M.; CANN, J.R. Geochemistry of basalts drilled in the North Atlantic by IPOD Leg. 49: implications for mantle heterogeneity. **Earth Planetary Science Letters**, v. 42, n. 1, p.77-97, 1979.

ZALÁN, P.V. A evolução estratigráfica da Bacia do Paraná (expanded abstract). In: 1º Simpósio de Geologia do Sudeste, 1989, Rio de Janeiro. **Boletim de Resumos**, Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, 1989, p. 206-207.

ZALÁN, P.V.; WOLF, S.; CONCEIÇÃO, J.C.; ASTOLFI, M.A.M.; VIEIRA, I.S.; APPI, C.T.; ZANOTTO, O.A. Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná. In: 3º SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 1987, Curitiba. **Atas**, Curitiba: Sociedade Brasileira de Geologia, v.1, 1987, p. 441-477.



## 8 APÊNDICES

### 8.1 APÊNDICE 1

#### Procedimentos empregados para a análise por Fluorescência de raios X no LAMIR

Foram selecionadas as amostras menos alteradas e sem a presença de amígdalas (exceto no caso das rochas do município de Capanema, onde foram utilizadas amostras com ocorrência de celadonita, devido à impossibilidade de separar esse mineral entre as fases matriz e amigdalóide) ou as fraturas preenchidas.

Com as amostras selecionadas, foi iniciada a preparação no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná, começando pela remoção da capa de alteração e cavidades preenchidas (Figura 51). As amostras foram britadas em um britador de mandíbula da marca Renard para diminuir a granulometria para aproximadamente 2 cm (Figura 52a). Algumas amostras foram britadas com martelo em panela de carbeto de tungstênio para permitir que amígdalas que estavam na porção interna das amostras fossem retiradas e não alterassem o resultado (Figura 52b).

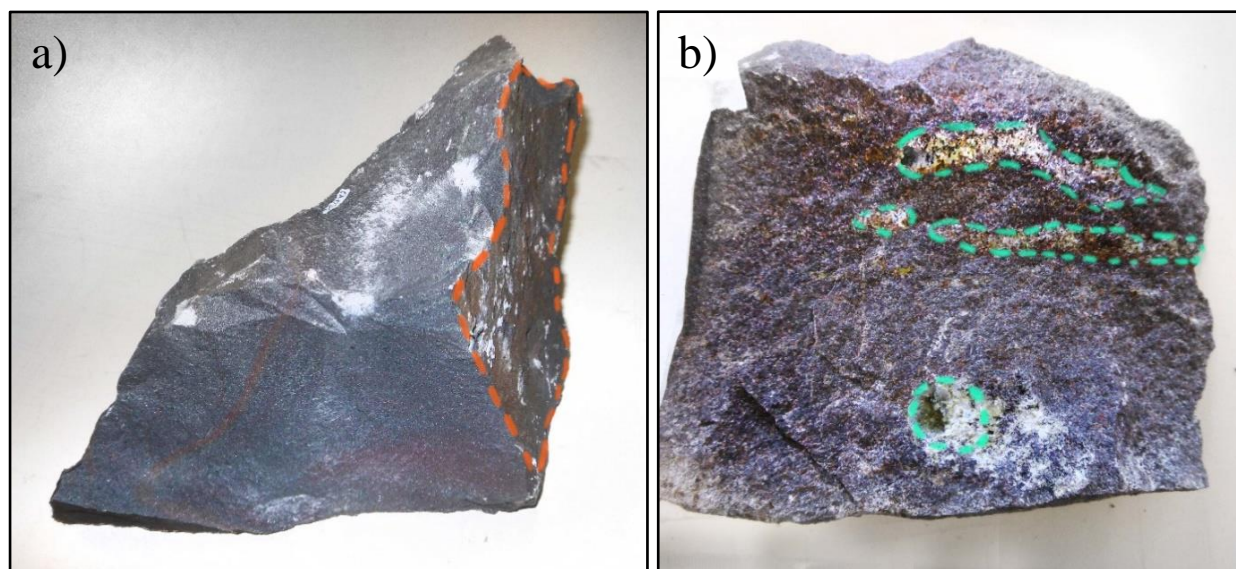


Figura 51 – Demarcação e retirada de porções das amostras para garantir resultados confiáveis. a) Capa de alteração; b) Preenchimentos de cavidades.

Em seguida, utilizou-se o jogo de quarteadores JONES de diversos tamanhos e diferentes espaçamentos para evitar artefatos de preparação nos resultados obtidos e foram separadas aproximadamente 30 g para pulverização. A pulverização das amostras

foi feita em placas de carbeto de tungstênio em moinho de disco da marca AMEF, como mostram as Figura 53a e Figura 53b, e colocadas em béqueres (Figura 54).

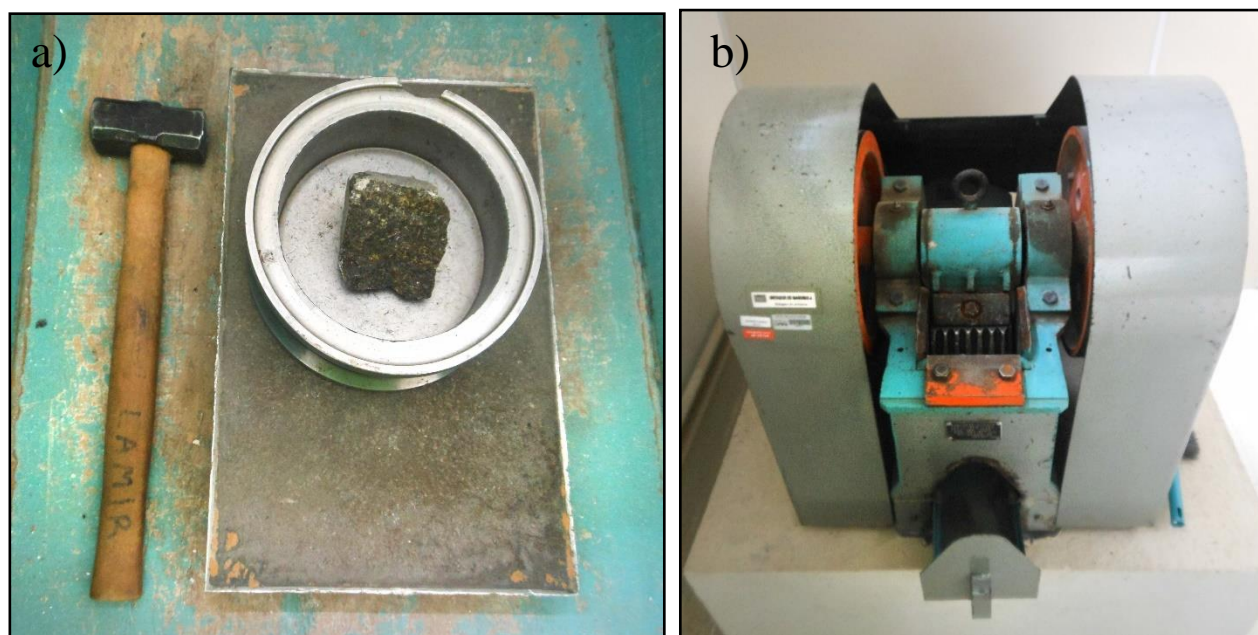


Figura 52 - Ferramentas e equipamentos utilizados para britar as amostras: a) Placa de carbeto de tungstênio contendo a amostra a ser quebrada com o martelo. b) Britador de mandíbula.

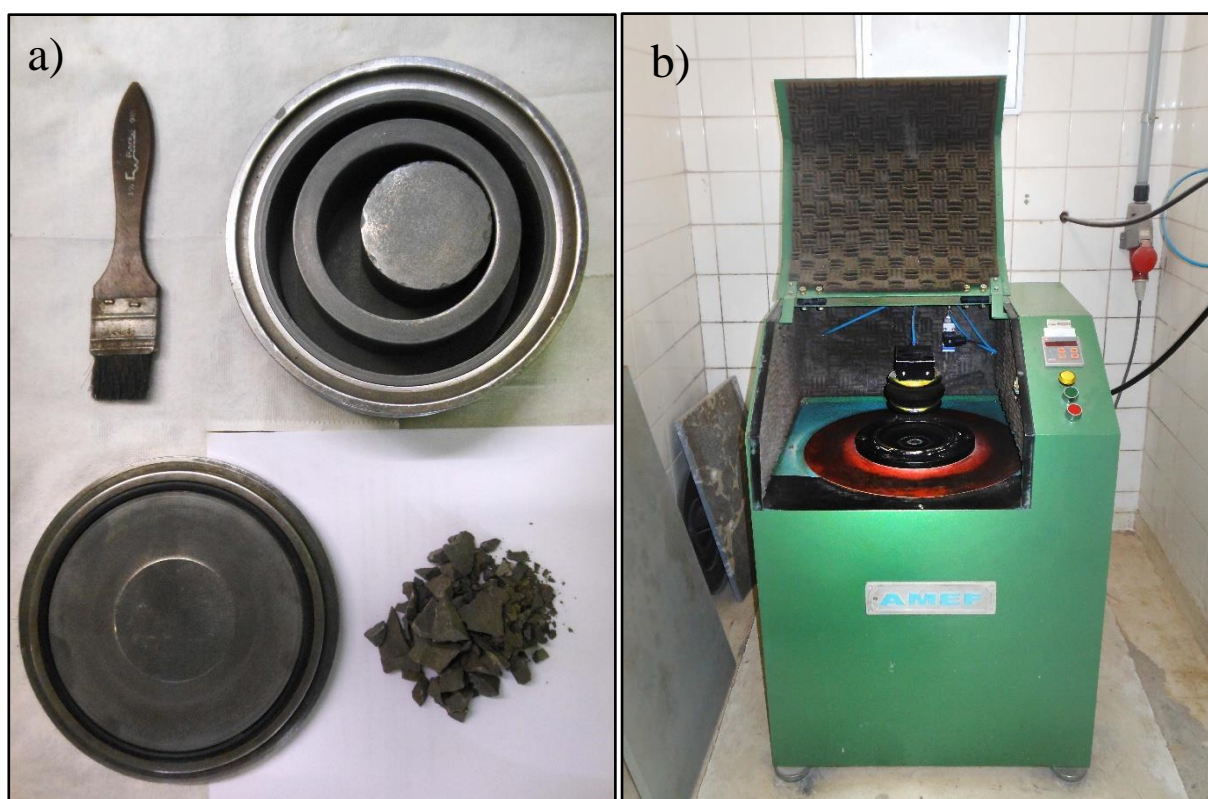


Figura 53 - Pulverização das amostras: a) Placa de carbeto de tungstênio com rebolos e b) Moinho de discos.





Figura 54 - Amostras pulverizadas e colocadas em béqueres.

O pó resultante foi colocado em uma estufa da marca Nevoni (Figura 55a) para secagem por 24 horas a 50°C. Para realizar a perda ao fogo (ou LOI - *Loss on Ignition*), foram separados 2 g de amostra e aquecidas a aproximadamente 1000°C por 2 horas, afim de medir a quantidade perdida de voláteis pelo contraste da massa inicial e final.

Para confecção da pérola fundida, foram pesadas 0,9 g de amostra e adicionados 9,0 g de tetraborato de lítio e 3 espátulas de pesagem rasas de nitrato de amônio. Essa mistura foi levada para a fusora (Figura 55b) a 1200°C por cerca de 20 minutos e em seguida deixada para resfriar.

A pérola foi, então, levada ao equipamento de fluorescência de raios X da marca PANalytical, modelo Axios Max tubo Ródio 4 kv (Figura 56). O resultado obtido é em porcentagem peso dos dez óxidos analisados.

Para o tratamento químico, os dados obtidos por FRX foram recalculados em base anidra, redistribuindo a porcentagem da perda ao fogo proporcionalmente entre os óxidos analisados.

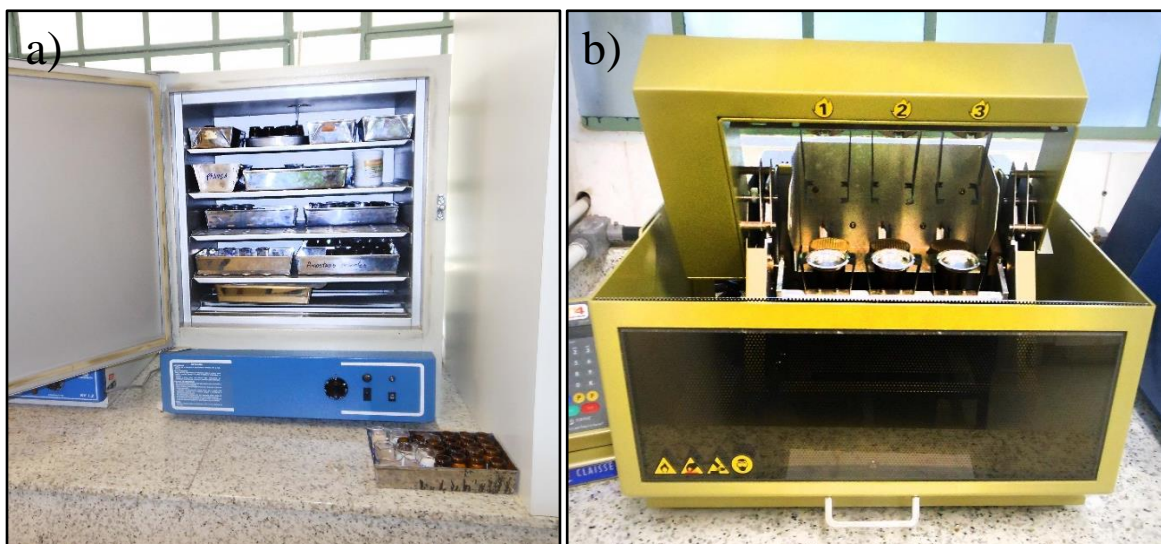


Figura 55 – Preparação das amostras para o cálculo da perda ao fogo e confecção da pérola fundida:  
a) Estufa para secagem das amostras e b) Fusora.



Figura 56 - Equipamento de fluorescência de raios X.

## 8.2 APÊNDICE 2

Limites de detecção para as análises feita pelas técnicas analíticas de FRX e ICP-MS.

Técnicas analíticas		Limites de detecção
FRX	Fusão alcalina com metaborato de lítio	SiO <sub>2</sub> (0,01%), TiO <sub>2</sub> (0,01%), Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (0,01%), Fe <sub>2</sub> O <sub>3(total)</sub> (0,01%), MgO (0,01%), CaO (0,01%), Na <sub>2</sub> O (0,01%), K <sub>2</sub> O (0,01%), P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (0,01%)
	Digestão por água régia	Ag (0,1 µg/g), As (0,5 µg/g), Au (0,1 µg/kg), Bi (0,1 µg/g), Cd (0,1 µg/g), Cu (0,1 µg/g), Hg (0,01 µg/g), Mo (0,1 µg/g), Ni (0,1 µg/g), Pb (0,1 µg/g), Sb (0,1 µg/g), Se (0,5 µg/g), Tl (0,1 µg/g) Zn (1 µg/g)
ICP-MS	Fusão por tetraborato de lítio e metaborato de lítio	Ba (1 µg/g), Be (1 µg/g), Ce (0,1 µg/g), Co (0,2 µg/g), Cs (0,1 µg/g), Dy (0,05 µg/g), Er (0,03 µg/g), Eu (0,02 µg/g), Ga (0,5 µg/g), Gd (0,05 µg/g), Hf (0,1 µg/g), Ho (0,02 µg/g), La (0,1 µg/g), Lu (0,01 µg/g), Nb (0,1 µg/g), Nd (0,3 µg/g), Pr (0,02 µg/g), Rb (0,1 µg/g), Sm (0,05 µg/g), Sn (1 µg/g), Sr (0,5 µg/g), Ta (0,1 µg/g), Tb (0,01 µg/g) Th (0,2 µg/g), Tm (0,01 µg/g), U (0,1 µg/g), V (8 µg/g), W (0,5 µg/g) Y (0,1 µg/g), Yb (0,05 µg/g), Zr (0,1 µg/g)

### 8.3 APÊNDICE 3

#### Abreviações e Siglas das Tabelas do Apêndice 3

Bas – Basalto

Peg - Pegmatito

C – Classificação

Peate - Peate (1989)

Paran - Paranapanema

L & L - Licht & Lima (2014)

T1 CN - Tipo 1 Centro-Norte

T1 S - Tipo 1 Sul



## Resultados analíticos de óxidos, elementos traço e ETR para as amostras estudadas de Barracão.

	Amostra	BA-01	BA-07	BB-03	BB-05	PR-01	PR-02	BA-02	BA-03	BA-05	BA-06	BA-08	BA-13	BA-16
	Tipo	Bas	Bas	Bas	Bas	Bas	Bas	Peg	Peg	Peg	Peg	Peg	Peg	Peg
Óxidos (% peso)	SiO <sub>2</sub>	51,32	51,05	50,94	51,17	51,51	51,54	50,43	50,54	50,39	51,71	49,77	50,96	50,37
	TiO <sub>2</sub>	2,49	2,46	2,16	2,20	2,39	2,40	2,86	3,08	3,08	2,72	3,18	3,40	3,44
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,65	12,60	13,38	12,98	12,72	12,64	12,09	11,86	11,74	12,32	11,66	11,10	11,29
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,13	15,99	15,05	15,29	15,89	15,83	17,25	17,65	17,67	16,49	18,17	18,65	18,62
	MnO	0,21	0,21	0,21	0,20	0,21	0,21	0,23	0,20	0,21	0,19	0,22	0,19	0,19
	MgO	4,66	4,66	5,03	5,01	4,74	4,51	4,19	3,49	3,79	3,84	4,03	3,12	3,35
	CaO	8,57	8,56	9,00	9,00	8,87	8,74	8,25	7,63	7,69	7,70	7,99	7,12	7,39
	Na <sub>2</sub> O	2,42	2,41	2,51	2,45	2,55	2,60	2,47	2,52	2,47	2,60	2,45	2,43	2,44
	K <sub>2</sub> O	1,26	1,24	1,12	1,11	1,14	1,26	1,32	1,49	1,51	1,47	1,38	1,61	1,54
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,30	0,29	0,25	0,26	0,28	0,28	0,32	0,38	0,37	0,37	0,34	0,41	0,39
	LOI	0,52	1,03	0,44	0,51	0,25	0,31	1,03	1,29	1,38	1,09	1,09	1,47	1,49
	Total	100,53	100,49	100,08	100,19	100,56	100,33	100,44	100,13	100,31	100,50	100,28	100,46	100,51
Minerais normativos (%)	qz	5,68	5,67	4,10	4,85	5,11	5,13	5,46	6,75	6,30	7,05	5,27	8,62	7,44
	pl	40,91	41,02	43,85	42,55	41,92	41,59	39,67	38,98	38,33	40,37	38,36	36,10	36,86
	or	7,56	7,45	6,74	6,68	6,80	7,56	7,98	9,04	9,16	8,86	8,33	9,75	9,34
	di	17,46	17,53	17,82	18,43	18,79	18,98	17,84	16,24	16,62	15,55	17,80	15,64	16,31
	hy	18,15	18,15	18,33	18,15	17,52	16,81	17,64	16,84	17,48	17,14	17,86	16,74	16,88
	il	4,79	4,77	4,16	4,24	4,58	4,62	5,55	6,00	6,00	5,26	6,17	6,63	6,70
	mt	4,74	4,73	4,44	4,51	4,65	4,65	5,10	5,25	5,25	4,87	5,39	5,55	5,54
	ap	0,70	0,70	0,58	0,60	0,65	0,65	0,76	0,90	0,88	0,88	0,81	0,97	0,93
Elementos traço (µg/g)	Ag	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,20	0,20	0,10	0,3	<0,1	0,2
	As	<0,5	<0,5	1,80	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
	Au *	9,2	2,1	5,40	3,60	6,70	6,60	5,40	6,80	9,50	10,60	5,7	11,5	6,7
	Ba	308,0	311,0	267,0	284,0	296,0	299,0	334,0	390,0	378,0	380,0	355,0	409,0	403,0
	Be	<1	2,0	3,0	<1	<1	2,0	1,0	2,0	<1	<1	<1	2,0	2,0
	Bi	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	Cd	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	Co**	67,1	64,4	62,8	61,1	63,9	62,3	80,9	69,2	66,8	61,4	68,6	56,3	63,1
	Cs	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,5	0,3	0,4	<1,0	0,3	0,5	0,5
	Cu	167,6	174,1	333,6	192,4	203,7	168,7	219,5	207,0	215,0	227,9	236,4	201,5	203,6
	Ga	18,3	16,8	18,5	17,3	19,3	17,6	18,4	19,4	18,8	18,5	18,8	19,2	18,7
	Hf	5,0	4,9	4,7	4,7	4,8	4,9	5,4	6,8	6,4	6,6	6,0	6,7	6,6
	Hg	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
	Mo	0,3	0,3	0,5	0,3	0,3	0,4	0,3	0,2	0,4	0,3	0,3	0,3	0,5
	Nb	14,7	14,7	12,9	12,9	14,3	14,7	16,2	18,2	19,3	18,3	17,3	20,8	20,3
	Ni	13,1	13,4	15,9	17,5	15,6	14,8	14,7	8,8	10,1	11,6	11,7	6,9	8,5
	Pb**	0,9	0,7	0,8	0,9	0,8	0,8	0,9	1,2	1,1	1,1	1,1	1,4	1,2
	Rb	26,5	26,0	23,6	22,7	28,5	28,5	31,3	35,2	35,4	28,7	33,2	41,7	37,0
	Sb	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	Se	<0,5	<0,5	14,3	0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,6	<0,5	<0,5	0,7	0,5
	Sn	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Sr	230,8	231,6	250,6	239,5	258,8	240,9	232,8	222,5	227,8	237,8	230,9	227,6	227,3
	Ta	1,1	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9	1,2	1,3	1,3	1,2	1,2	1,4	1,5
	Th	2,3	2,4	2,1	2,1	2,5	2,3	2,5	2,9	3,0	3,0	2,7	3,4	3,1
	Tl	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	U	0,4	0,2	0,1	0,1	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,4
	V	457	438	418	429	460	433	573	427	485	347	564	306	412
	W**	169,9	155,0	140,1	133,8	137,0	143,4	238,9	207,6	176,0	175,4	170,5	119,3	150,8
	Y	34,6	35,6	32,6	33,7	36,6	35,3	80,2	195,9	92,1	42,6	137,1	109,4	163,7
	Zn	46,0	49,0	58,0	49,0	47,0	50,0	68,0	77,0	73,0	47,0	81,0	79,0	79,0
	Zr	191,5	190,9	167,0	166,8	190,9	185,7	206,2	244,1	239,0	233,5	217,5	267,9	252,5

	Amostra	BA-01	BA-07	BB-03	BB-05	PR-01	PR-02	BA-02	BA-03	BA-05	BA-06	BA-08	BA-13	BA-16
	Tipo	Bas	Bas	Bas	Bas	Bas	Bas	Peg	Peg	Peg	Peg	Peg	Peg	Peg
ETR ( $\mu\text{g/g}$ )	La	21,5	21,3	18,5	19,0	22,3	20,4	27,5	33,4	32,2	27,7	31,5	36,4	34,4
	Ce	49,1	49,1	41,9	43,3	48,2	48,3	52,7	60,3	59,0	61,1	57,3	68,2	64,8
	Pr	6,23	6,05	5,45	5,49	6,13	6,05	7,78	9,22	8,92	7,30	8,56	9,49	9,73
	Nd	27,9	26,5	23,1	23,2	27,0	25,7	35,9	46,6	40,8	30,9	41,5	41,7	44,9
	Sm	6,28	6,03	5,49	5,50	5,84	6,04	8,90	10,93	10,41	6,74	10,21	9,64	11,23
	Eu	1,93	1,82	1,71	1,78	1,90	1,80	2,89	3,54	3,41	2,16	3,37	3,04	3,68
	Gd	7,02	6,90	6,20	6,24	6,96	7,08	13,49	21,12	16,05	8,12	18,74	14,13	20,61
	Tb	1,07	1,08	0,98	1,00	1,05	1,06	2,00	2,68	2,34	1,28	2,47	2,05	2,69
	Dy	6,94	6,80	6,19	6,67	7,01	6,92	13,23	17,36	15,51	7,74	16,45	13,04	17,39
	Ho	1,37	1,35	1,22	1,28	1,38	1,35	2,66	4,08	3,25	1,52	3,70	3,11	4,11
	Er	4,04	3,77	3,65	3,57	3,72	3,91	8,19	11,18	9,28	4,25	10,82	9,29	11,52
	Tm	0,58	0,58	0,51	0,52	0,56	0,57	1,16	1,34	1,28	0,63	1,49	1,33	1,43
	Yb	3,85	3,62	3,29	3,31	3,56	3,60	7,52	6,93	8,15	4,00	8,18	7,18	7,13
	Lu	0,57	0,57	0,50	0,51	0,57	0,55	1,22	1,06	1,33	0,62	1,37	1,18	1,19
C	Peate	Paran	Paran	Paran	Paran	Paran	Paran	Paran	Paran	Paran	Paran	Paran	Paran	Paran
	L & L	T1 S	T1 S	T1 S	T1 S	T1 S	T1 S	Tipo 3	Tipo 3	Tipo 3	T1 S	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 3

\* Valores de Au em ppb.

\*\* Valores de Co, Pb e W refletem contaminação da coleta e preparação das amostras.

Resultados analíticos de óxidos, elementos traço e ETR para as amostras estudadas de Capanema.

	Amostra	CA-03	CA-04	CA-30	CA-31	CA-06	CA-19	CA-21	CA-23	CA-24	CA-27
	Tipo	Bas	Bas	Bas	Bas	Peg	Peg	Peg	Peg	Peg	Peg
Óxidos (% peso)	SiO <sub>2</sub>	50,50	50,89	49,98	49,92	49,03	50,14	49,20	49,89	50,67	50,23
	TiO <sub>2</sub>	2,21	2,19	2,24	2,15	3,74	3,65	3,71	3,62	3,37	3,45
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,51	13,46	13,53	13,46	11,43	11,71	11,80	11,64	12,07	11,94
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,71	14,01	14,33	14,35	18,39	17,99	18,00	17,82	17,18	17,42
	MnO	0,19	0,20	0,22	0,20	0,24	0,20	0,21	0,23	0,17	0,22
	MgO	5,64	5,67	5,78	5,65	4,08	3,85	4,01	3,85	3,77	3,89
	CaO	9,82	9,92	9,98	9,71	6,36	6,16	6,12	5,92	6,12	6,33
	Na <sub>2</sub> O	2,50	2,65	2,45	2,48	2,41	2,61	2,58	2,53	2,72	2,57
	K <sub>2</sub> O	1,23	1,02	1,01	1,25	2,95	2,78	2,82	3,07	2,73	2,98
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,26	0,25	0,25	0,26	0,37	0,38	0,37	0,41	0,41	0,37
	LOI	-0,16	-0,08	0,71	0,29	0,88	0,63	1,44	1,38	1,09	1,13
	Total	99,57	100,26	100,45	99,72	99,88	100,10	100,26	100,37	100,31	100,52
Minerais normativos (%)	qz	2,23	2,25	1,96	1,45	3,90	3,08	4,02	4,73	5,42	4,43
	pl	43,84	44,62	44,28	43,64	32,82	34,79	34,97	33,51	36,42	34,61
	or	7,39	6,09	6,03	7,51	17,85	16,78	17,08	18,56	16,49	17,97
	di	20,95	21,45	20,86	20,65	14,84	13,72	13,26	13,05	12,71	14,17
	hy	16,69	16,71	17,76	17,75	14,27	18,34	14,55	14,22	13,83	13,57
	il	4,25	4,20	4,31	4,16	7,27	7,07	7,22	7,03	6,53	6,67
	mt	4,03	4,10	4,22	4,23	8,19	5,32	8,03	7,93	7,63	7,71
	ap	0,60	0,58	0,58	0,60	0,88	0,90	0,88	0,97	0,97	0,88
Elementos traço (µg/g)	Ag	0,2	0,2	0,2	0,2	<0,1	<0,1	0,2	0,2	<0,1	<0,1
	As	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
	Au *	6,2	5,8	6,0	5,2	7,9	8,0	8,5	7,1	7,1	8,6
	Ba	319,0	313,0	312,0	335,0	401,0	429,0	429,0	445,0	484,0	440,0
	Be	<1	<1	2,0	1,0	<1	<1	<1	<1	<1	1,0
	Bi	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	Cd	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	Co**	77,2	77,9	65,0	68,9	65,0	62,5	56,8	57,0	62,5	58,0
	Cs	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,6	0,3	0,4	0,3	0,2	0,5
	Cu	261,2	228,9	239,6	261,0	280,6	290,4	281,2	258,6	289,2	287,8
	Ga	17,3	16,7	17,1	17,3	20,2	19,5	18,6	19,5	21,2	19,4
	Hf	3,9	3,9	3,9	3,8	5,7	5,8	5,9	6,2	6,3	5,9
	Hg	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
	Mo	0,5	0,6	0,4	0,5	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4
	Nb	12,7	12,1	12,7	12,5	20,3	20,7	21,3	21,7	21,4	19,0
	Ni	30,4	28,6	28,6	27,0	12,5	10,2	10,1	8,1	10,2	11,5
	Pb**	0,6	0,6	0,7	0,6	1,4	1,7	1,9	1,7	1,4	1,3
	Rb	28,7	20,1	18,4	31,8	117,6	102,4	101,0	112,8	95,1	110,7
	Sb	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	Se	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
	Sn	1	1	<1	1	1	1	1	1	2	1
	Sr	379,9	381,1	385,0	383,5	350,8	362,0	371,0	357,8	379,7	358,1
	Ta	0,9	0,8	0,8	0,9	1,4	1,4	2,0	1,5	1,4	1,2
	Th	2,2	1,9	2,1	1,8	3,0	3,1	3,1	3,5	3,6	3,2
	Tl	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	U	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3
	V	443	430	439	432	609	542	545	521	480	562
	W**	246,0	246,9	135,2	164,3	163,8	162,7	131,2	114,1	148,9	128,6
	Y	24,8	25,9	24,8	25,5	31,4	32,8	35,6	35,7	34,2	31,3
	Zn	61,0	65,0	60,0	60,0	116,0	115,0	157,0	150,0	92,0	109,0
	Zr	153,2	145,0	147,0	145,2	214,2	226,8	218,5	236,0	240,1	212,8

	Amostra	CA-03	CA-04	CA-30	CA-31	CA-06	CA-19	CA-21	CA-23	CA-24	CA-27
	Tipo	Bas	Bas	Bas	Bas	Peg	Peg	Peg	Peg	Peg	Peg
ETR ( $\mu\text{g/g}$ )	La	20,4	18,7	19,8	20,5	27,9	29,4	28,6	30,5	30,3	28,7
	Ce	44,9	43,3	43,3	44,2	61,7	64,7	63,0	68,5	67,2	63,6
	Pr	5,48	5,44	5,41	5,37	7,72	7,85	7,83	8,53	8,20	7,53
	Nd	22,4	24,0	22,7	22,9	33,0	33,5	32,7	35,1	34,6	33,8
	Sm	4,94	4,93	4,96	4,98	6,74	6,96	6,71	7,25	7,32	6,96
	Eu	1,67	1,58	1,62	1,59	2,27	2,26	2,19	2,35	2,41	2,24
	Gd	5,22	5,57	5,29	5,22	7,19	7,45	7,23	7,46	7,66	7,02
	Tb	0,80	0,81	0,82	0,79	1,08	1,11	1,13	1,17	1,13	1,03
	Dy	4,79	4,80	4,86	4,85	6,29	6,52	6,68	7,29	6,65	6,25
	Ho	0,94	0,90	0,96	0,95	1,27	1,30	1,37	1,42	1,33	1,28
	Er	2,60	2,73	2,76	2,62	3,54	3,67	3,84	4,20	3,69	3,47
	Tm	0,38	0,38	0,38	0,38	0,50	0,56	0,54	0,57	0,55	0,54
	Yb	2,51	2,40	2,34	2,54	3,25	3,63	3,48	3,52	3,61	3,33
	Lu	0,39	0,36	0,34	0,35	0,49	0,55	0,52	0,56	0,54	0,52
C	Peate	Paran	Paran	Paran	Paran	Paran	Paran	Paran	Paran	Paran	Paran
	L & L	T1 CN	T1 CN	T1 CN	T1 CN	Tipo 3	Tipo 3	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 4	Tipo 3

\* Valores de Au em ppb.

\*\* Valores de Co, Pb e W refletem contaminação da coleta e preparação das amostras.

## 8.4 APÊNDICE 4

Cálculo do fator de enriquecimento para os ETR e para o Y, dado pela razão entre a concentração no líquido diferenciado ( $C_L$ ) e no magma inicial ( $C_0$ ). Para isso, foi calculada a média, acompanhada pelo desvio padrão, para os pegmatitos (MédP e  $\sigma P$ ) e, em seguida, para os basaltos (MédB e  $\sigma B$ ). Dados de Barracão.

Amostra	BA-01	BA-07	BB-03	BB-05	PR-01	PR-02	BA-02	BA-03	BA-05	BA-06	BA-08	BA-13	BA-16	MédP	$\sigma P$	MédB	$\sigma B$	$C_L/C_0$
Tipo	Bas	Bas	Bas	Bas	Bas	Bas	Peg	Peg	Peg	Peg	Peg	Peg	Peg	-	-	-	-	-
Y	34,6	35,6	32,6	33,7	36,6	35,3	80,2	195,9	92,1	42,6	137,1	109,4	163,7	117,3	48,4	34,7	1,3	3,4
La	21,5	21,3	18,5	19,0	22,3	20,4	27,5	33,4	32,2	27,7	31,5	36,4	34,4	31,9	3,1	20,5	1,4	1,6
Ce	49,1	49,1	41,9	43,3	48,2	48,3	52,7	60,3	59,0	61,1	57,3	68,2	64,8	60,5	4,7	46,7	2,9	1,3
Pr	6,23	6,05	5,45	5,49	6,13	6,05	7,78	9,22	8,92	7,30	8,56	9,49	9,73	8,71	0,83	5,90	0,31	1,48
Nd	27,9	26,5	23,1	23,2	27,0	25,7	35,9	46,6	40,8	30,9	41,5	41,7	44,9	40,3	5,0	25,6	1,8	1,6
Sm	6,28	6,03	5,49	5,50	5,84	6,04	8,90	10,93	10,41	6,74	10,21	9,64	11,23	9,72	1,42	5,86	0,29	1,66
Eu	1,93	1,82	1,71	1,78	1,90	1,80	2,89	3,54	3,41	2,16	3,37	3,04	3,68	3,16	0,48	1,82	0,07	1,73
Gd	7,02	6,90	6,20	6,24	6,96	7,08	13,49	21,12	16,05	8,12	18,74	14,13	20,61	16,04	4,26	6,73	0,37	2,38
Tb	1,07	1,08	0,98	1,00	1,05	1,06	2,00	2,68	2,34	1,28	2,47	2,05	2,69	2,22	0,46	1,04	0,04	2,13
Dy	6,94	6,80	6,19	6,67	7,01	6,92	13,23	17,36	15,51	7,74	16,45	13,04	17,39	14,39	3,18	6,76	0,28	2,13
Ho	1,37	1,35	1,22	1,28	1,38	1,35	2,66	4,08	3,25	1,52	3,70	3,11	4,11	3,20	0,84	1,33	0,06	2,42
Er	4,04	3,77	3,65	3,57	3,72	3,91	8,19	11,18	9,28	4,25	10,82	9,29	11,52	9,22	2,31	3,78	0,16	2,44
Tm	0,58	0,58	0,51	0,52	0,56	0,57	1,16	1,34	1,28	0,63	1,49	1,33	1,43	1,24	0,27	0,55	0,03	2,24
Yb	3,85	3,62	3,29	3,31	3,56	3,60	7,52	6,93	8,15	4,00	8,18	7,18	7,13	7,01	1,31	3,54	0,19	1,98
Lu	0,57	0,57	0,50	0,51	0,57	0,55	1,22	1,06	1,33	0,62	1,37	1,18	1,19	1,14	0,23	0,55	0,03	2,09

Cálculo do fator de enriquecimento para os ETR e para o Y, dado pela razão entre a concentração no líquido diferenciado ( $C_L$ ) e no magma inicial ( $C_0$ ). Para isso, foi calculada a média, acompanhada pelo desvio padrão, para os pegmatitos (MédP e  $\sigma P$ ) e, em seguida, para os basaltos (MédB e  $\sigma B$ ). Dados de Capanema.

Amostra	CA-03	CA-04	CA-30	CA-31	CA-06	CA-19	CA-21	CA-23	CA-24	CA-27	MédP	$\sigma P$	MédB	$\sigma B$	$C_L/C_0$
Tipo	Bas	Bas	Bas	Bas	Peg	Peg	Peg	Peg	Peg	Peg	-	-	-	-	-
Y	24,8	25,9	24,8	25,5	31,4	32,8	35,6	35,7	34,2	31,3	33,5	1,8	25,3	0,5	1,3
La	20,4	18,7	19,8	20,5	27,9	29,4	28,6	30,5	30,3	28,7	29,2	0,9	19,9	0,7	1,5
Ce	44,9	43,3	43,3	44,2	61,7	64,7	63,0	68,5	67,2	63,6	64,8	2,4	43,9	0,7	1,5
Pr	5,48	5,44	5,41	5,37	7,72	7,85	7,83	8,53	8,20	7,53	7,94	0,33	5,43	0,04	1,46
Nd	22,4	24,0	22,7	22,9	33,0	33,5	32,7	35,1	34,6	33,8	33,8	0,8	23,0	0,6	1,5
Sm	4,94	4,93	4,96	4,98	6,74	6,96	6,71	7,25	7,32	6,96	6,99	0,23	4,95	0,02	1,41
Eu	1,67	1,58	1,62	1,59	2,27	2,26	2,19	2,35	2,41	2,24	2,29	0,07	1,62	0,03	1,42
Gd	5,22	5,57	5,29	5,22	7,19	7,45	7,23	7,46	7,66	7,02	7,34	0,21	5,33	0,14	1,38
Tb	0,80	0,81	0,82	0,79	1,08	1,11	1,13	1,17	1,13	1,03	1,11	0,04	0,81	0,01	1,38
Dy	4,79	4,80	4,86	4,85	6,29	6,52	6,68	7,29	6,65	6,25	6,61	0,34	4,83	0,03	1,37
Ho	0,94	0,90	0,96	0,95	1,27	1,30	1,37	1,42	1,33	1,28	1,33	0,05	0,94	0,02	1,42
Er	2,60	2,73	2,76	2,62	3,54	3,67	3,84	4,20	3,69	3,47	3,74	0,24	2,68	0,07	1,39
Tm	0,38	0,38	0,38	0,38	0,50	0,56	0,54	0,57	0,55	0,54	0,54	0,02	0,38	0,00	1,43
Yb	2,51	2,40	2,34	2,54	3,25	3,63	3,48	3,52	3,61	3,33	3,47	0,14	2,45	0,08	1,42
Lu	0,39	0,36	0,34	0,35	0,49	0,55	0,52	0,56	0,54	0,52	0,53	0,02	0,36	0,02	1,47